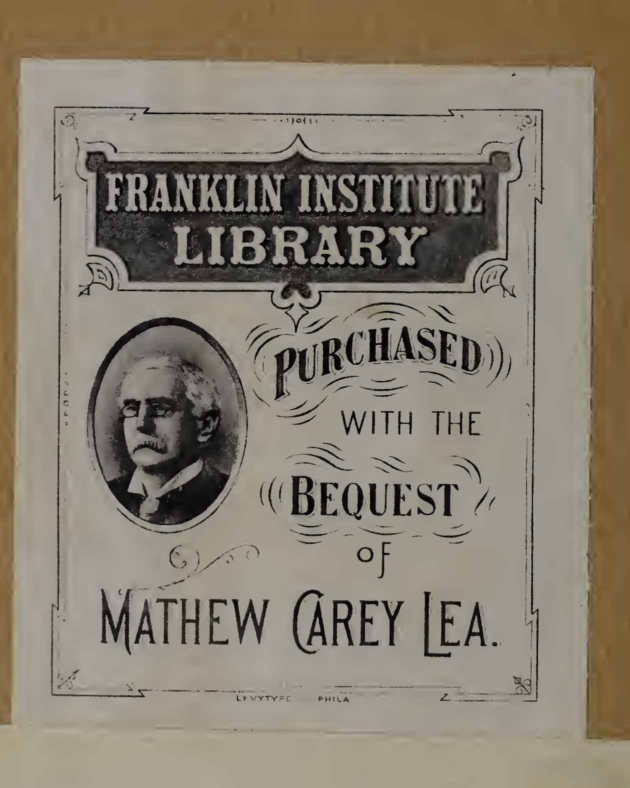

FRANKLIN INSTITUTE
LIBRARY
PURCHASED
WITH THE
BEQUEST
OF
MATHEW CAREY LEA.
LEVYTYPE PHILA

# LES COULEURS

ET

# LA PHOTOGRAPHIE

## EN VENTE A LA MÊME SOCIÉTÉ D'ÉDITIONS

(Envoi franco contre un mandat-poste adressé au Directeur)

---

**La Conquête de la Mer,** par MM. L. Ernault et E. Jaubert, un volume cartonné avec figures. 1 fr. 50

**Le même** (édition de luxe) . . . . . . . . . . 4 fr. 50

**Le Célibataire au point de vue social,** par M. Louis Ernault, un volume broché faisant partie de la Petite Encyclopédie Sociale et Juridique. . 2 fr. »

**Pour nos Soldats.** — Conseils pratiques, Hygiène et morale du service militaire, par MM. G.-H. Niewenglowski et L. Ernault, un vol. broché. 1 fr. 75

**Notions Elémentaires d'Optique Photographique,** par M. Niewenglowski, licencié ès-sciences, président de la Société des Amateurs photographes, un vol. broché avec fig. (*sous presse*).

**L'Objectif photographique, fabrication, essai, emploi,** par M. G.-H. Niewenglowski, un volume broché avec figures. . . . . . . . . . 2 fr. »

**La photographie en voyage et en excursion,** par le même . . . . . . . . . . . . . . . . . 2 fr. »

**Utilisation des vieux négatifs et des plaques voilées,** par le même . . . . . . . . . . 1 fr. 25

**La matériel de l'Amateur photographe,** choix, essai, entretien, par le même. (Paris, Gauthier-Villars) . . . . . . . . . . . . . . . . 1 fr. 75

**Dictionnaire photographique** (*sous presse*) . . .

**Notions élémentaires de Photographie** (5e édition), Paris. . . . . . . . . . . . . . . . . 1 fr. »

**Formulaire-Aide-Mémoire** du ph tographe, un volume broché . . . . . . . . . . . . . 2 fr. 50

**Manuels des Baccalauréats,** sous la direction de M. G.-H. Niewenglowski.

Cette collection, qui comprend environ une vingtaine de volumes, est destinée aux candidats aux divers baccalauréats, qui y trouveront les éléments certains d'un prompt succès. Les auteurs se sont efforcés de présenter les diverses matières demandées aux examens avec clarté, simplicité et précision.

**La Photographie.** — Procédés et matériels, applications scientifiques, artistiques et industrielles, journal mensuel illustré publié sous la direction de M. G.-H. Niewenglowski. Rédacteur en chef : A. Reyner ; Secrétaire : E. Roux. — Abonnements : Un an : France 5 francs. Etranger . . . . . . . . . . . . 6 fr. »
Rédaction : 45, rue Daguerre, Paris.

BIBLIOTHÈQUE GÉNÉRALE DE PHOTOGRAPHIE

# LES COULEURS

ET

# LA PHOTOGRAPHIE

## REPRODUCTION PHOTOGRAPHIQUE

## directe et indirecte des couleurs

HISTORIQUE — THÉORIE — PRATIQUE

*ouvrage illustré de nombreuses figures et planches hors texte*

PAR MM.

Gaston-Henri NIEWENGLOWSKI ET Armand ERNAULT

Licenciés ès sciences




PARIS

SOCIÉTÉ D'ÉDITIONS SCIENTIFIQUES

PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE

4, RUE ANTOINE-DUBOIS, 4

1895

A NOTRE ILLUSTRE MAÎTRE

Monsieur Gabriel LIPPMANN

MEMBRE DE L'INSTITUT

Hommage respectueux

G.-H. NIEWENGLOWSKI. A. ERNAULT.

# PRÉFACE

Si l'on considère avec soin les objets que renferme la nature, on ne tarde pas à s'apercevoir qu'ils se présentent à nous avec un triple caractère : ils ont une forme, des couleurs et sont ou peuvent être animés de mouvement. Si nous examinons les images de ces objets vus dans une chambre noire, sur la glace dépolie de l'appareil du photographe par exemple, nous les voyons garder cette complexité d'aspect qui les diversifie. Fixer ces images avec leur modelé et leur coloration, en saisir même le mouvement et en reproduire à volonté les phases : tel est le but multiple que s'est proposé la photographie.

Deux Français, Daguerre et Nicephore Niepce résolurent, en 1839, la première partie du problème, et donnèrent le moyen de fixer, en noir et blanc, la forme des objets sur une surface sensible. En modifiant cette dernière de manière à en augmenter l'impressionnabilité, on ne tarda

pas à pouvoir fixer l'image des objets en mouvement, comme s'ils étaient immobiles. Mais, en procédant ainsi, la photographie, dite instantanée, ne donnerait avec une seule image qu'une idée inexacte du mouvement lui-même. Un Français, M. Marey, professeur au Collège de France, peut-être précédé par un étranger, M. Muybridge, put, à l'aide des ingénieuses méthodes chronophotographiques imaginées par lui, inaugurer l'étude photographique du mouvement, en en faisant l'analyse. Cette étude sera heureusement complétée par la synthèse, c'est-à-dire par la reconstitution du mouvement ainsi analysé, synthèse déjà à peu près réalisée.

Quant à la fixation des couleurs, c'est un problème qui a passionné tous les chercheurs, même avant l'invention de Daguerre; mais pas plus ceux qui tentèrent une reproduction directe que ceux qui essayèrent une solution indirecte de la question n'étaient arrivés à des résultats réellement satisfaisants, lorsqu'un Français, M. Gabriel Lippmann, résolut complètement le problème en 1891. Chargé, lors de sa nomination comme professeur titulaire à la Sorbonne, d'enseigner l'Acoustique et l'Optique, branches de la physique qu'il n'avait pas encore explorées, il trouva dans cet

enseignement le point de départ de sa belle découverte. Et, fait caractéristique, il n'avait jamais fait de photographie. C'est uniquement en réfléchissant sur le phénomène des interférences, un des chapitres les plus intéressants de l'Acoustique et de l'Optique, que M. Lippmann imagina sa méthode plus remarquable encore peut-être par la simplicité de la conception que par la beauté des résultats (1).

Malgré la netteté de la solution théorique, il fallut à l'éminent professeur plus de trois ans d'un travail acharné pour arriver à obtenir sa première photographie colorée du spectre solaire. Cependant le jour où les couleurs lui apparurent pour la première fois, l'émotion de l'inventeur fut moindre que la satisfaction du savant : il ne s'agissait pas, comme on l'a dit quelquefois à tort, d'une découverte due au hasard, mais bien d'une découverte poursuivie systématiquement en vertu d'une conception scientifique dans laquelle le théoricien pouvait légitimement avoir la même confiance que Leverrier prédisant, à la suite de calculs purement mathématiques, l'apparition de la planète Neptune.

(1) Voir à ce sujet un article de M. A. Berget, dans la *Revue illustrée*, sur M. G. Lippmann.

Pour bien comprendre le principe de la nouvelle méthode, il est nécessaire d'avoir tout d'abord une idée exacte de la nature de la lumière et des couleurs. C'est pourquoi nous avons cru bon de résumer dans la première partie de cet ouvrage, aussi clairement et aussi succinctement que possible, les théories acceptées aujourd'hui. La lecture préalable de cet exposé permettra, même à ceux qui seraient peu familiarisés avec ces questions délicates, de comprendre aisément la théorie de l'expérience fondamentale de M. Lippmann.

D'autre part, le procédé Lippmann n'est pas encore à la portée de tous les praticiens, amateurs ou industriels.

Nous avons donc fait suivre notre exposé de l'indication rapide des méthodes de reproduction indirecte des couleurs dont l'industrie, bien qu'elle ne l'ait pas encore suffisamment fait en France, peut tirer un grand parti en attendant les progrès nécessaires de la méthode élégante de M. G. Lippmann.

Nous serions heureux que cet ouvrage contribuât à développer en France aussi bien les essais individuels de reproduction directe des objets colorés que l'application industrielle des

méthodes indirectes de reproduction des couleurs, méthodes dont le principe est aussi dû à des Français et que nous voyons à regret — comme trop d'autres inventions — entrées bien plus avant dans la pratique courante à l'étranger que dans le pays même où elles ont pris naissance. Nous nous sommes attachés dans ce but à faire œuvre de vulgarisation scientifique, espérant que notre ouvrage sera lu avec profit non-seulement par les photographes, amateurs ou professionnels, mais encore par tous ceux qui s'intéressent aux progrès de la science française.

---

J'avais commencé la rédaction de cet ouvrage il y a près de deux ans avec M. Arm. Ernault, lorsque la mort est venu m'enlever un excellent ami et un collaborateur précieux auquel il me sera permis de rendre un dernier hommage.

J'ai pu mettre à profit, pour compléter notre publication, les notes manuscrites laissées par lui et demeurées en la possession de M. Louis Ernault, son frère, qui m'a aidé en outre à revoir

les épreuves du travail terminé. Qu'il reçoive ici tous mes remerciements pour l'empressement avec lequel il a bien voulu me prêter son concours.

Paris, le 15 décembre 1894.

G.-H. NIEWENGLOWSKI,

Président de la Société des Amateurs photographes.
Directeur du journal *La Photographie*.

45, rue Daguerre.

---

# PREMIÈRE PARTIE

---

## Propriétés de la lumière.

# LES COULEURS ET LA PHOTOGRAPHIE

## PREMIÈRE PARTIE

## La lumière

### I

### Propagation de la lumière.

Sensation lumineuse. — Corps lumineux et opaques. — Ombre et pénombre. — Images de la chambre noire.

Chacun des organes des sens révèle à l'homme une série de notions spéciales. L'odorat et le goût lui font connaître les odeurs et les saveurs ; le toucher, l'étendue et la solidité des corps. L'ouïe perçoit les sons avec toutes les variations de ton, d'intensité, de timbre qui peuvent les caractériser. La vue, enfin, saisit la lumière et les couleurs. L'œil, est, on le sait, l'organe grâce auquel l'impression des objets extérieurs, transmise au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique, s'y transforme en perception visuelle.

La sensation de lumière se produit quelle que soit la cause d'excitation du nerf optique. Qu'on le

comprime ou qu'on le galvanise, l'ébranlement se traduira toujours par une perception lumineuse.

Ce ne sont là, bien entendu, que des cas exceptionnels, et l'on aura donné une idée exacte du mode de manifestation de la lumière en la définissant comme la cause normale de la mise en activité du nerf optique.

La visibilité n'est pas une propriété substantielle des corps. En d'autres termes, tous les corps visibles qui nous entourent ne sont pas visibles au même titre ; nous voyons les uns, parce qu'ils sont *lumineux* par eux-mêmes ; nous apercevons les autres seulement parce qu'ils sont *éclairés* par la lumière émanée des premiers.

Le soleil est la source de lumière la plus connue et la plus féconde. Les étoiles sont également des foyers puissants d'irradiation. Mais les planètes — et, parmi elles, la Terre — sont des astres naturellement obscurs. La lumière dont Vénus, Mars, Saturne, Jupiter.... nous paraissent resplendir pendant la nuit est en réalité empruntée aux soleils de l'espace céleste, grâce à un phénomène de réflexion de tous points analogue à celui que nous décrivons brièvement plus loin (1).

La lumière, quelles que soient sa cause et sa nature, doit, pour être perçue, se transmettre du

(1) V. Chap. II.

corps lumineux ou éclairé jusqu'à l'œil. On appelle corps *opaque* tout corps qui, placé entre l'œil de l'observateur et la source lumineuse, met obstacle à cette propagation. Un corps *transparent* ou *diaphane* est celui qui, dans les mêmes conditions, laisse passer la lumière et percevoir la forme des objets qui se trouvent derrière lui. Si, sans pouvoir distinguer les objets, on reconnaît seulement la présence de la lumière, le corps est dit *translucide.*

Le bois, la pierre, les métaux sous une épaisseur suffisante sont des corps opaques.

L'air, l'eau, le verre poli sont transparents. Les métaux eux-mêmes deviennent perméables à la lumière quand ils sont présentés sous forme de lames très minces. C'est ainsi que les feuilles d'or d'un dix-millième de millimètre d'épaisseur fabriquées dans l'industrie de la dorure laissent passer une lumière verte.

Un papier huilé, une plaque de verre dépoli sont des corps translucides.

Il est d'observation courante que la propagation de la lumière a lieu suivant une direction rectiligne. Un écran opaque intercepte la lumière d'une bougie lorsqu'il se trouve rencontrer la ligne droite idéale qui joindrait l'œil de l'observateur à la source lumineuse. Si l'on regarde une étoile à travers un long tube rectiligne percé d'un trou suivant son axe, l'astre ne sera visible qu'autant qu'il se trouvera

sur le prolongement de l'axe du tube. On peut encore le montrer en faisant passer un étroit faisceau lumineux émané d'une lanterne à projections sur un verre dépoli ; celui-ci s'éclaire sur le trajet de la lumière, montrant ainsi nettement sa propagation rectiligne AB.

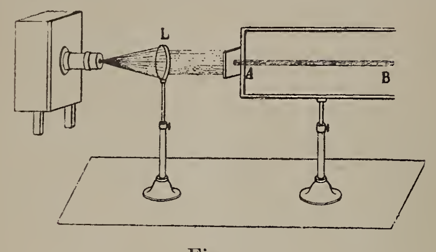


Fig. 1.

On donne le nom de rayon lumineux à la droite figurée suivant laquelle se propage la lumière. Cette expression de *rayon* vient peut-être, de même que celle de rayon de circonférence ou de rayon de cercle, d'une comparaison métaphorique entre les irradiations, émises de tous côtés par les sources lumineuses, et les rais ou rayons d'une roue ordinaire, distribués également dans tous les sens à partir du moyeu.

La propagation de la lumière n'a lieu en ligne droite qu'autant que le milieu transparent à travers lequel s'effectue cette propagation est en même temps un milieu homogène, c'est-à-dire dont la composition et la densité demeurent les mêmes sur tout le parcours des rayons lumineux. Nous envisagerons exclusivement le cas d'un pareil milieu dans notre exposition de deux théories importantes :

1° La théorie des *ombres* projetées derrière eux par les corps opaques ;

2° La théorie de la *production des images à travers les petites ouvertures*. Cette dernière théorie nous donnera par anticipation une première idée de la disposition des chambres noires employées dans les appareils photographiques décrits dans la troisième partie de ce livre.

1° *Théorie des ombres.* — Nous avons appelé corps opaque tout corps susceptible d'arrêter les rayons lumineux qui le rencontrent. Il y a donc, derrière un pareil corps, un espace obscur, dû précisément à l'opacité de ce corps et que l'on désigne sous le nom d'*ombre portée*.

Soit, d'abord, pour plus de simplicité, un corps opaque, M, de forme sphérique, et une source lumineuse, S, réduite à un point (fig. 2). Menons une droite SM tangente à notre sphère, et faisons-la tourner autour du point S en la laissant constamment appuyée sur le corps opaque. Cette droite décrira une surface conique ayant pour sommet le point S et contenant la sphère M dans son intérieur. Toute la surface de la sphère tournée vers S est éclairée, mais toute la

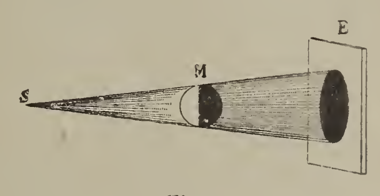


Fig. 2.

partie opposée reste dans l'obscurité, et il en est de même de la portion de l'espace située derrière le corps opaque par rapport au point S. Un écran E placé au-delà de la sphère suffira pour mettre en évidence la formation de l'ombre.

Considérons maintenant une source lumineuse de *dimensions sensibles* — seule hypothèse réalisable dans la pratique, — et, pour simplifier, supposons que cette source affecte, comme le corps opaque, une forme sphérique.

Si l'on construit le cône ARB tangent *extérieurement* à la fois aux deux sphères, on voit, par le seul examen de la figure, que nul rayon émané de S ne parviendra à un point *m* qui serait situé dans l'intérieur de ce cône et au-delà de M par rapport à S. On constatera donc, comme tout à l'heure, la production sur un écran d'une zone d'ombre *absolue* AB (fig. 3).

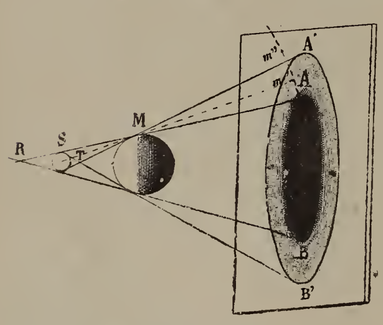


Fig. 3.

Traçons maintenant le cône A'TB', tangent *intérieurement* aux deux sphères S et M, et soient *m'* et *m''* deux points, situés à égale distance de la ource lumineuse S, mais placés, l'un, *m''*, en dehors

du cône A'TB', l'autre, *m'* entre A'TB' et le premier cône ARB.

On voit, au premier coup d'œil, que la présence du corps opaque est indifférente à l'éclairement du point *m"*.

Au contraire, une partie des rayons envoyés de S à *m'* est interceptée par la sphère opaque M, et cette partie est d'autant plus importante que le point *m'* se rapproche davantage du cône d'ombre absolue ARB.

On appelle *pénombre* l'espace A'B'AB situé au-delà de la sphère opaque M par rapport à la source lumineuse S, et compris entre les deux surfaces coniques ARB et A'TB'. La lumière y décroît progressivement à mesure que le point envisagé se trouve plus voisin de la région d'ombre proprement dite, AMB. On remarquera, comme une conséquence nécessaire de la construction même de la figure, que la grandeur de l'espace annulaire A'ABB' comparée à celle de l'ombre absolue AB augmente à mesure que l'on recule l'écran sur lequel on reçoit l'ombre du corps opaque.

La production de la pénombre nous explique pourquoi les ombres projetées par le soleil ne sont pas terminées par une ligne brusquement tranchée. La théorie que nous venons d'esquisser dans le cas d'une source lumineuse de forme sphérique peut évidemment, en effet, s'appliquer au soleil.

Le phénomène se complique toutefois, en ce sens

que les corps qui ne sont pas directement éclairés par le soleil peuvent l'être par la réverbération de la lumière solaire réfléchie sur les corps voisins.

2° *Images à travers les petites ouvertures.* — Si, dans le volet d'une chambre obscure, on perce un

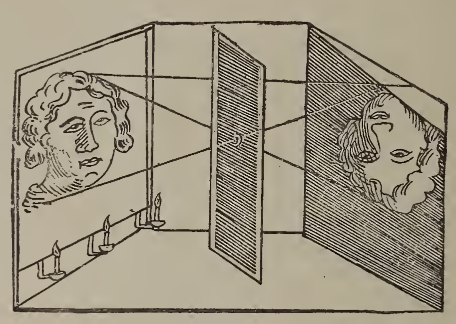


Fig. 4.

trou de quelques millimètres de diamètre, on voit apparaître sur le mur opposé l'image renversée des objets situés au dehors, ainsi reproduits avec leur forme et leur couleur. La propagation rectiligne de la lumière explique ce phénomène comme les précédents.

Il suffit, en effet, de remarquer que chacun des points d'un objet éclairé peut être considéré comme étant une véritable source artificielle de lumière, puisqu'il rayonne de tous côtés les rayons lumineux qu'il reçoit. Chacun de ces points détermine donc,

sur le mur faisant office d'écran, une petite surface lumineuse ayant la forme même de l'ouverture ménagée dans le volet. Si cette ouverture est très petite, son image peut être regardée comme un simple point lumineux. Les rayons émanés du corps considéré se croisant d'ailleurs à travers l'ouverture, ce sont les rayons partis du sommet de l'objet qui viennent rencontrer dans la chambre noire le point inférieur du mur, et inversement, ceux qui viennent des points inférieurs de l'objet frappent la partie la plus élevée de l'écran. L'ensemble de tous ces points lumineux doit donc bien donner une image *renversée* du corps extérieur.

Si le trou pratiqué dans le volet est trop grand, il y a empiètement, superposition l'une sur l'autre des images du trou dessinées sur l'écran, comme nous l'avons dit, par chaque point des objets extérieurs. On n'a donc plus qu'une image générale indistincte, et même qu'un simple éclairement uniforme : c'est ce qui se produit dans nos appartements, où la lumière pénètre à travers les vitres des fenêtres sans projeter d'images des corps situés au dehors.

Nous venons de montrer comment se propage la lumière dans un milieu transparent et homogène. Nous allons maintenant envisager le cas où la lumière rencontre un milieu différent de celui à travers lequel elle se transmettait.

D'une manière générale les rayons incidents se divisent alors en trois catégories (Fig. 5) :

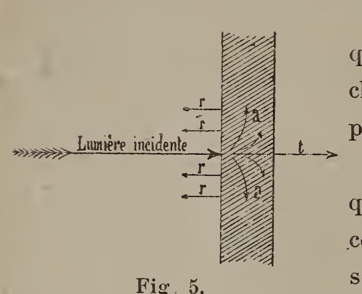



Fig. 5.

1° Les rayons, tels que *r*, qui sont réfléchis, c'est-à-dire renvoyés par la surface du corps ;

2° Les rayons, tels que *t*, qui traversent ce corps soit en ligne droite, soit en déviant plus ou moins de leur route ;

3° Les rayons, tels que *a*, *a*, absorbés par le corps.

Nous étudierons successivement les lois qui régissent chacun de ces phénomènes.

## II

## Réflexion et diffusion de la lumière.

Lois de la réflexion. — Diffusion. — Corps translucides — Opalescence.

Quand la lumière rencontre une surface polie, une partie des rayons lumineux est renvoyée par surface. Ce phénomène, auquel on a donné le nom de *réflexion*, est régi par les deux lois suivantes :

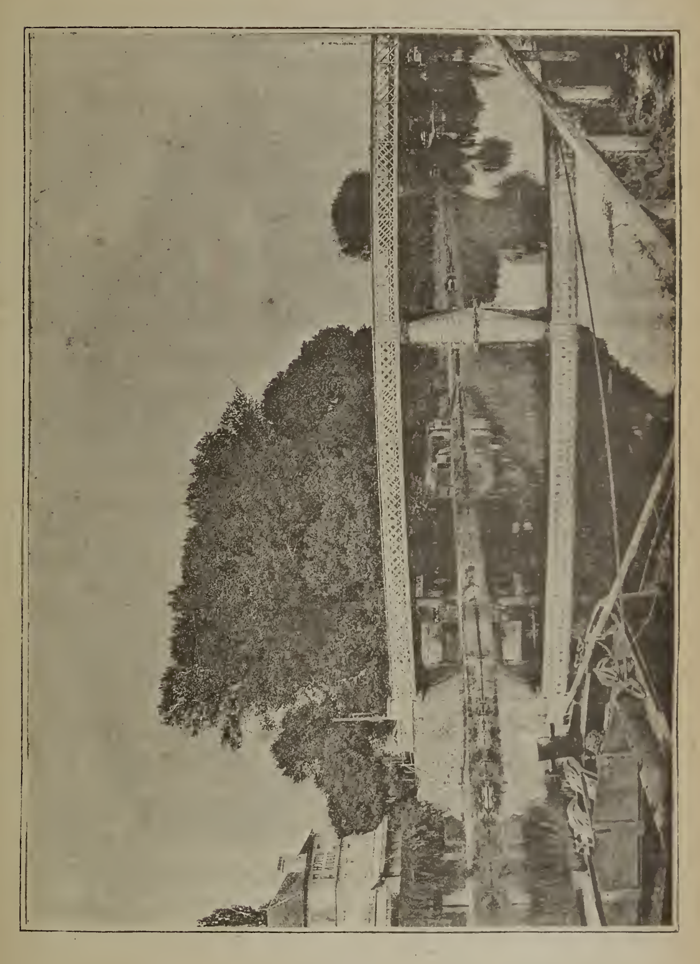


Fig. 6.

1° *Le rayon réfléchi demeure dans le plan déterminé par le rayon incident et la normale au point d'incidence à la surface réfléchissante ;*

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence*. Ces deux angles sont respectivement l'angle formé avec la normale au point d'incidence par le rayon réfléchi et par le rayon incident.

Les miroirs étant le type des surfaces parfaitement polies, la réflexion sur de pareilles surfaces porte indifféremment les noms de réflexion *régulière* ou réflexion *spéculaire* (1).

La surface d'une nappe d'eau tranquille forme un miroir et c'est ainsi qu'on voit s'y refléter l'image des objets placés sur ses rives (fig. 6).

Si la surface frappée par la lumière est une surface *mate*, c'est-à-dire présente un grand nombre de petites aspérités, les rayons lumineux reviennent bien encore en arrière, mais non plus dans une direction unique. Il y a comme un éparpillement des rayons lumineux, auquel on donne le nom de *diffusion*. C'est ce qui se passe par exemple à la surface d'une nappe d'eau agitée (fig. 7).

La *diffusion* nous donne l'explication d'un certain nombre d'effets assez importants. C'est elle qui nous fait voir les objets, car la *réflexion régulière* ne donne pas l'image des corps réfléchissants, mais

(1) Du mot latin *speculum*, qui signifie miroir.

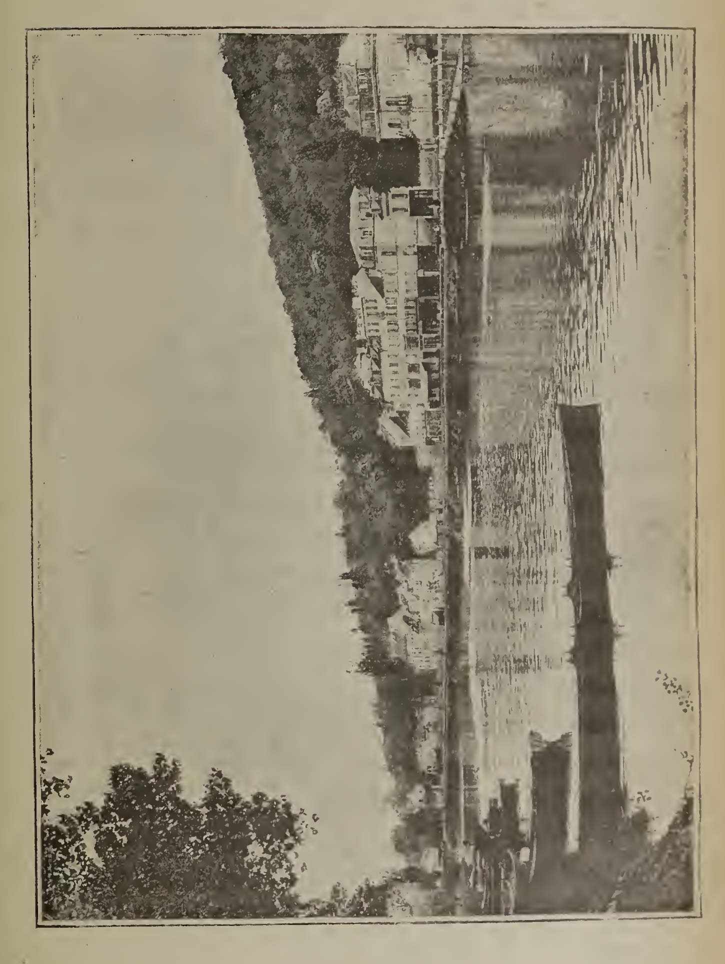


Fig. 5.

bien celle du corps reflété. Par exemple, une lame de verre à glace, transparente et à faces bien polies, étant placée dans une pièce obscure et sur le trajet d'un faisceau lumineux, un observateur placé dans la pièce ne sera pas, en règle générale, impressionné par le faisceau lumineux : il ne verra ni les rayons réfléchis, ni la glace. Si, au contraire, on recouvre cette même lame de glace d'une feuille de papier, on apercevra aussitôt une tache lumineuse correspondant à l'intersection du papier et du faisceau lumineux. On exprime cette propriété en disant que le papier est un corps *diffusif.*

On peut rattacher aux phénomènes de diffusion la translucidité dont nous avons dit un mot plus haut. Si l'on regarde une source lumineuse, une bougie, par exemple, à travers une lame mince de verre à glace, l'observateur continue à voir la source sans que la présence de la vitre soit perceptible pour lui. Mais, si l'on recouvre cette glace d'une feuille de papier ou si l'on y substitue une lame de verre dépoli, la lumière, diffusée à la surface de ce nouveau corps, parvient diffusée à l'œil. L'observateur verra donc désormais la lame interposée entre lui et la source lumineuse, mais il n'apercevra plus la source elle-même et sera seulement averti de son existence par l'éclairement de la lame.

L'opalescence de certains corps est également due

à une diffusion qui, au lieu de s'opérer à la surface, s'opère à l'intérieur du corps.

Dans le cas de réflexion régulière, une construction géométrique très simple suffit pour trouver la direction des rayons réfléchis : il suffit de mener la normale au point où tombe le rayon considéré, et de tracer, à ce même point une droite faisant avec ladite normale un angle égal à l'angle d'incidence, tel qu'il a été défini plus haut.

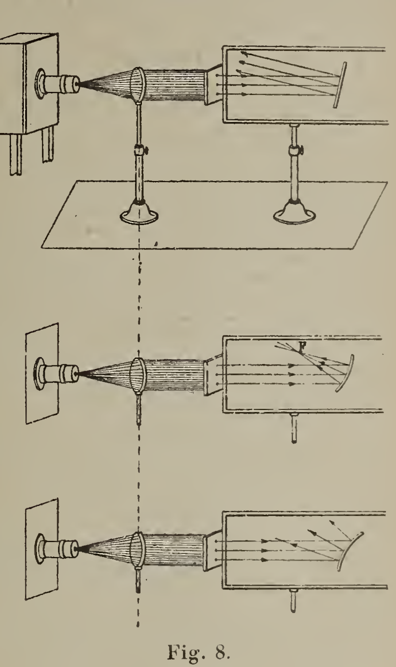



Fig. 8.

On constate ainsi les cas particuliers suivants que nous signalons en raison de leur importance pratique :

1° Des faisceaux de rayons parallèles, réfléchis sur un miroir *plan*, deviennent parallèles entre eux après leur réflexion ;

2° Les mêmes faisceaux, renvoyés par un miroir concave, sont convergents après leur réflexion ;

3° Ils divergent au contraire s'ils ont été réflétés sur un miroir convexe.

La figure 8 ci-contre montre une vérification expérimentale de ces trois énoncés. Au moyen d'une lanterne de projections et d'une lentille on a dirigé successivement trois faisceaux étroits de rayons parallèles sur un miroir plan (*a*), sur un miroir concave (*b*) et sur un miroir convexe (*c*). Ces trois miroirs sont appuyés sur une plaque de verre dépoli qui s'illumine au passage des rayons incidents et des rayons réfléchis, et permet ainsi de constater leur direction réelle.

## III

### Réfraction de la lumière.

**Lois de la réfraction. — Réflexion totale. — Déviation par le prisme.**

Toutes les fois qu'un faisceau lumineux rencontre *obliquement* la surface de séparation de deux milieux transparents, les rayons non réfléchis de ce faisceau éprouvent une certaine déviation en pénétrant dans le second milieu. On donne à ce phénomène le nom de *réfraction*.

Soit AB, une nappe d'eau, SI un rayon lumineux rencontrant obliquement cette nappe au point I. Ce rayon, au lieu de continuer sa route suivant la droite IS', prolongement de SI, s'infléchit en pénétrant dans le liquide, et y prend une direction IR.

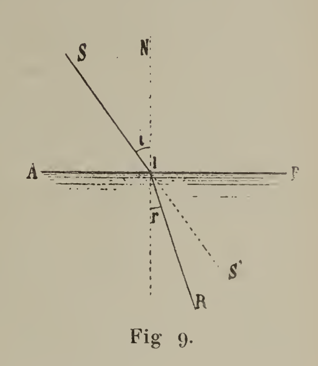


Fig 9.

On appelle *plan d'incidence* le plan déterminé par le rayon incident SI et la normale ou perpendiculaire IN à la surface AB, au point I. L'angle SIN (*i*) est l'angle d'incidence ; *r*, l'angle de réfraction. Si *r* est plus petit que *i*, le second est dit plus *réfringent* que le premier. C'est le cas pour la figure 9, où le rayon lumineux est supposé passer de l'air dans l'eau.

En général, un corps est d'autant plus réfringent que sa densité est plus grande.

Descartes a fait connaître le premier les lois de la réfraction, telle que nous venons de la décrire (1). Ces lois sont les suivantes :

(1) Nous n'avons parlé que de la réfraction *simple*. Pour certains milieux transparents cristallisés, comme le spath d'Islande ou le gypse, il y a *double* réfraction : un seul rayon incident donne naissance à deux rayons réfractés. Huyghens et Fresnel ont étudié cette curieuse propriété qui a fait qualifier de *biréfringents* les corps qui la possèdent.

1° *Le rayon réfracté demeure dans le plan d'incidence ;*

2° *Quelle que soit l'obliquité du rayon incident, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant pour deux mêmes milieux* (1).

Nous avons là l'explication de ce qui se passe dans l'expérience bien connue du bâton brisé. Eclairé par la lumière qui pénètre dans l'eau, un point quelconque de la partie plongée, renvoie à son tour des rayons lumineux. Si l'on envisage un faisceau parti de l'extrémité du bâton, ce faisceau, comme nous venons de le dire, s'incline sur la

(1) Nous rappelons que si l'on décrit, d'un point I comme centre, avec un rayon IA égal à l'unité, une circonférence ABCD, et que l'on y trace les deux diamètres AC et BD perpendiculaires l'un à l'autre, on appelle sinus d'un angle quelconque *a*IB la perpendiculaire *ab* abaissée du point *a* sur BI (fig. 10).

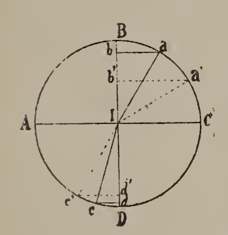


Fig. 10.

Si donc *a*I et *a'*I représentent deux rayons lumineux incidents, en I, sur une nappe d'eau AC, I*c* et I*c'*, les rayons réfractés correspondants respectivement à *a*I et à *a'*I, la seconde des deux lois que nous venons d'indiquer s'énoncera mathématiquement par l'égalité suivante :

$$\frac{ab}{cd} = \frac{a'b'}{c'd'} = K,$$

*K* représentant une quantité constante pour deux mêmes milieux, l'air et l'eau, dans notre hypothèse.

C'est cette quantité constante que l'on appelle *indice de*

surface de l'eau au moment où il en émerge. L'œil recevant les rayons déviés *voit* l'objet comme situé sur leur prolongement, comme *brisé*, par suite au point où il rencontre la surface, puisque la déviation porte seulement sur la portion immergée (fig. 9).

Nous avons dit qu'il y avait réfraction lorsqu'un rayon lumineux se présentait sous un incident *oblique* pour passer d'un milieu transparent dans un autre. Si le rayon lumineux est perpendiculaire à la surface de séparation des deux milieux, ce rayon continue à se propager en ligne droite. Même alors, cependant, il y a réflexion d'une partie de la lumière. Cette portion réfléchie, très petite pour des rayons perpendiculaires, augmente, par rapport à la portion réfractée, à mesure que le rayon incident fait un angle de plus en plus grand avec la normale au point d'incidence. Cet angle a pour limite l'angle de 90°, puisqu'alors le rayon serait perpendiculaire à la normale et parallèle par suite au second milieu, qu'il ne pourrait rencontrer. Mais, jusque-là, et bien que la réflexion aille toujours en augmentant, il y a toujours réfraction d'une partie des rayons qui pénètrent de l'air dans l'eau, *l'angle de réfraction étant plus petit que l'angle d'incidence.*

Il n'en est plus de même quand un rayon lumineux

*réfraction* (*). De l'air à l'eau, elle est égale à 4/3 ; de l'eau à l'air, elle est, inversement, de 3/4. Sur la figure 10, si la source lumineuse est supposée en *c'* au lieu d'être en *a*, le rayon lumineux *c'*I se présentant en I pour sortir de l'eau dans l'air, prendra, en changeant de milieu, la direction I *a'*, plus inclinée que *c'* I par rapport à la surface AC.

(*) La lumière blanche, nous le démontrerons plus loin, est, en réalité, composée de rayons colorés diversement *réfrangibles*, c'est-à-dire plus ou moins déviés par la réfraction. Pour être rigoureusement exacts on doit donc dire par rapport à quelle couleur (et même par rapport à quelle voie du spectre solaire) a été calculé l'indice de réfraction. Nous nous référerons à la raie D (V. *Infra*, chap. IV.)

se présente pour pénétrer d'un milieu dans un autre moins réfringent. Soit, en effet, RI un rayon passant de l'eau dans l'air au point I. Ce rayon (fig. 11) se réfracte en émergeant, et sort suivant une direction telle que IS, l'angle SIN devant être plus grand que l'angle RIN. Ce dernier angle augmentant, SIN s'accroît également, et devient, pour une certaine position R'I du rayon lumineux, précisément égal à CIN; en d'autres termes, le rayon venant de l'eau dans une direction R'I en sort en faisant avec la normale NI un angle de 45°, c'est-à-dire *parallèlement à la surface de séparation des deux milieux*. On comprend, des lors, que l'angle R'IN soit le plus grand angle sous lequel un rayon R'I puisse se présenter pour donner encore naissance à un rayon émergent de l'eau dans l'air. En effet, si cet angle R'IN' augmentait, l'angle NIC devrait augmenter proportionnellement; par suite, la direction NI étant invariable, la ligne IC suivant laquelle émergeait le rayon R'I, devrait descendre *au-dessous* de l'eau.

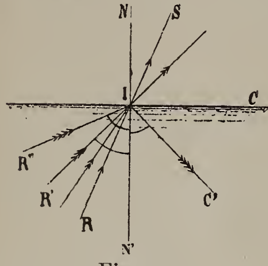


Fig. 11.

L'angle R'IN' se nomme *angle limite*. Pour tout angle plus grand, tel que R"IN', il n'y a plus de réfraction au point I ; toute la lumière incidente est réfléchie dans l'intérieur de l'eau. Les lois de cette *réflexion totale* sont du reste les mêmes que celles de la réflexion ordinaire (*supra*, chap. II) ; le rayon R"I suivra donc une direction C'I telle que l'angle C'IN' soit égal à l'angle R'IN'.

De l'eau à l'air, l'angle limite est de 48° 35'.

C'est sur ces phénomènes de réflexion totale que sont basées les fontaines lumineuses et ce sont eux qui permettent d'expliquer le mirage.

De nombreux instruments ont été imaginés en vue de l'étude ou de l'utilisation des phénomènes

de la réfraction. Les prismes et les lentilles sont les plus simples de ces appareils. Nous consacrerons aux lentilles un chapitre spécial. Occupons-nous tout d'abord des prismes.

La définition du prisme, en optique, doit être un peu plus générale que celle du solide désigné sous le même nom en géométrie. Nous appellerons prisme tout milieu transparent limité par deux faces planes inclinées l'une sur l'autre. L'angle dièdre suivant lequel ces deux faces se coupent est *l'angle réfringent* du prisme, dont la *base* est la face opposée à cet angle. Les prismes employés dans les expériences sont taillés d'ordinaire dans des blocs de verre homogène, et fixés sur une monture articulée, comme le montre la figure 12.

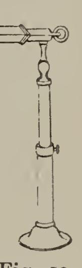


Fig. 12.

Un faisceau de lumière, rouge par exemple (1), qui rencontre un prisme de flint (2), P, éprouve deux déviations, l'une à son entrée dans le prisme, et l'autre à sa sortie dans l'air. Ces deux déviations,

(1) Nous supposons un faisceau de rayons lumineux d'une seule couleur pour éviter la production d'un spectre solaire (V. Ch. IV. *infra*).

(2) Le *flint* est une espèce de verre plus réfringent que le verre ordinaire. Il contient beaucoup de plomb.

Le *crown-glas* ou *crown*, autre sorte de verre fréquemment employé, renferme peu de plomb et est moins réfringent que le *flint*.

ainsi qu'il résulte des lois énoncées plus haut, sont de même sens, et tendent l'une et l'autre *à rapprocher les rayons incidents de la base du prisme.*

La figure 13 montre en D' l'image déviée d'un faisceau de rayons rouges envoyés, au moyen de la lentille L, sur le prisme P. En D est représentée une image non déviée de ce faisceau, due à une portion de rayons non réfractés.

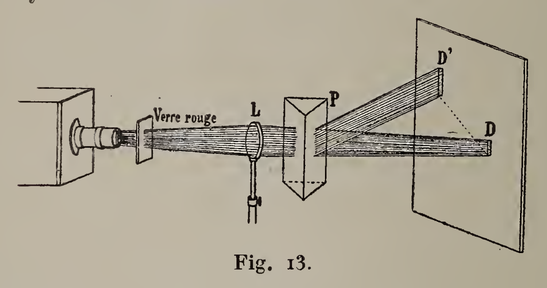



Fig. 13.

L'angle formé par le rayon émergent et le prolongement du rayon réfracté est *l'angle de déviation* du prisme.

Pour un même prisme, cet angle varie avec l'angle d'incidence, en décroissant avec lui jusqu'à un angle minimum qui se produit quand l'angle d'incidence et l'angle d'émergence sont égaux. Il augmente avec l'angle réfringent du prisme, comme on le démontre au moyen du *prisme à angle variable* (fig. 14), dans lequel deux plaques de verre peuvent jouer sur des charnières entre deux plaques métalliques fixes. On emplit d'eau cette sorte d'auge, et,

en inclinant plus ou moins l'une des deux faces en verre de l'appareil, on voit qu'un faisceau lumineux projeté sur le prisme ainsi obtenu est d'autant plus dévié que l'angle variable des deux plaques de verre (supposées prolongées jusqu'à leur intersection) est plus grand.

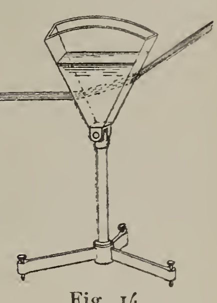


Fig. 14.

*L'angle de déviation* varie enfin pour une même incidence des rayons lumineux, suivant la *nature* du prisme observé. La déviation croît avec l'indice de réfraction du milieu transparent. En recevant à la fois plusieurs faisceaux parallèles de rayons rouges sur un *polyprisme*, c'est-à-dire sur un système de prismes de même angle mais de substances inégalement réfringentes, ayant leurs arêtes dans le prolongement l'une de l'autre, on observe des faisceaux d'autant plus déviés à leur sortie que le petit prisme qui les a réfractés était un indice de réfraction plus élevé (fig. 15).

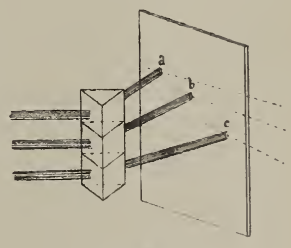



Fig. 15.

La réflexion totale, dont nous avons précédemment parlé, se produit fréquemment avec les prismes. Il suffit que les rayons lumineux, — qui ont toujours

pu pénétrer dans le verre, puisque le verre est plus réfringent que l'air — se présentent à la seconde face sous un angle supérieur à l'angle limite du verre, qui est de 41°48'. Cette seconde face fonctionne alors comme le ferait un miroir plan et réfléchit les rayons selon les lois déjà énoncées (*Supra* chap. III). On trouve fréquemment intérêt, dans les expériences d'optiques, à employer à la place de miroir des prismes disposés de façon à agir sur la lumière par réflexion totale.

## IV

### Dispersion de la lumière.

Décomposition et recomposition de la lumière blanche. — Spectre solaire et ses raies.

Quand on dirige un faisceau de lumière *blanche* sur un prisme, non seulement ce faisceau est dévié de sa première direction par le prisme, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, mais encore il s'étale, et se nuance de vives couleurs. La figure 16 montre comment se présente le phénomène, qui constitue ce qu'on appelle la dispersion de la lumière.

En recevant le faisceau émergent sur un écran blanc, on obtient une image allongée, colorée des couleurs bien connues de l'arc-en-ciel; c'est ce qu'on

nomme un *spectre*. Les teintes se suivent et se fondent insensiblement l'une dans l'autre ; on peut cependant distinguer sept couleurs principales qui sont, dans leur ordre successif et en commençant par la moins déviée : *rouge*, *orangé*, *jaune*, *vert*, *bleu*, *indigo*, *violet*.

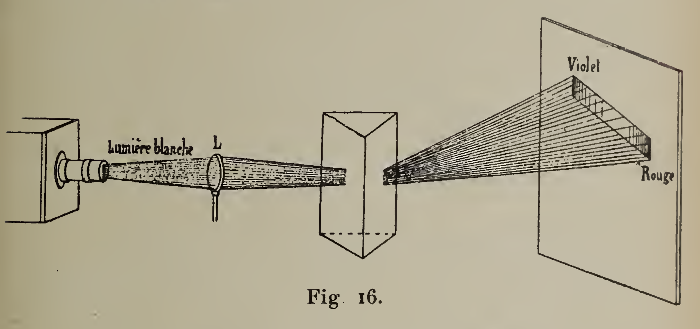



Fig. 16.

Deux conséquences principales résultent de cette expérience célèbre :

1° *La lumière blanche n'est pas une lumière simple, mais une lumière composée. Elle provient de la superposition d'une infinité de rayons diversement colorés.*

2° *Ces rayons lumineux possèdent chacun un indice de réfraction différent, c'est-à-dire sont chacun inégalement déviés par la réfraction.*

Newton, à qui sont dues ces deux propositions, a confirmé sa théorie en montrant :

1° Que les couleurs du spectre sont simples. — Si, en effet, on isole au moyen d'un écran convena-

blement disposé, une de ces couleurs et qu'on la reçoive sur un second prisme, il n'y a pas de nouvelle dispersion ; la lumière reste, après sa sortie du prisme, identique comme couleur à ce qu'elle était avant d'y pénétrer.

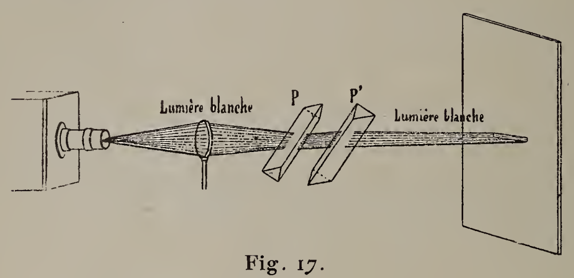



Fig. 17.

2° Que la réunion de toutes ces couleurs produit sur l'œil l'effet de la lumière blanche. — Soit un prisme P sur lequel on fait tomber, au moyen d'une lentille, un faisceau lumineux emané d'une lanterne à projection (fig. 17.) Ce prisme, s'il est seul, déviera la lumière qui ira former un spectre sur l'écran. Si, au contraire, cette lumière déviée est, à sa sortie du prisme P, reçue sur un second prisme P' identique au premier mais tourné en sens contraire, la deuxième déviation imprimée aux rayons détruira exactement la première, et l'on obtiendra une image blanche sur l'écran.

Même résultat quel que soit le procédé employé pour réunir les rayons, par exemple si au prisme P' on substitue une lentille cylindrique C (fig. 18).

Enfin, si, au moyen d'un prisme, on dévie une partie seulement des rayons qui ont traversé la lentille, on aura sur l'écran deux images *a* et *b* de couleurs différentes, couleurs qui, par leur réunion, donneraient du blanc. On les appelle *couleurs complémentaires*. Le rouge et le vert, le jaune et le bleu... sont complémentaires l'un de l'autre. Nous parlons, bien entendu, des couleurs du spectre, et

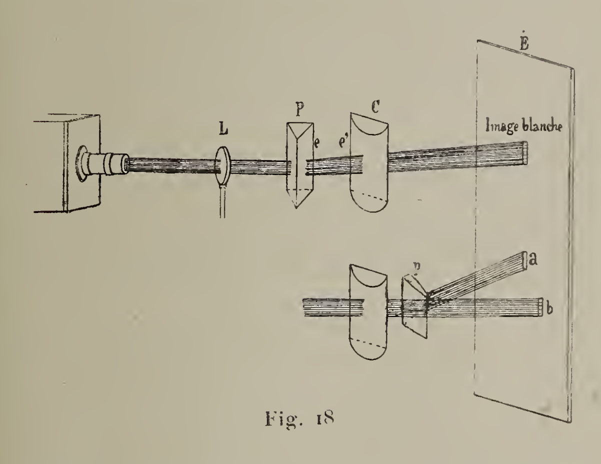



Fig. 18

non des couleurs employées par les peintres. Ces dernières sont loin d'être des nuances de composition simple, et leur mélange conduit à de tout autres résultats. Le jaune et le bleu, notamment, mélangés sur la palette, donneraient du vert et non du blanc.

Nous avons supposé qu'on recevait sur un écran

*blanc* le spectre étudié. C'est que les corps blancs sont les seuls dont chaque partie emprunte la couleur même de la région du spectre qui les éclaire. Un écran rouge, par exemple, eût bien paru rouge dans les rayons rouges, faiblement rouge aussi dans le jaune ; mais il eût semblé *noir* dans le vert et dans le bleu (Voir IIe partie, chap. IV).

Le phénomène de la dispersion de la lumière rend compte de l'irisation apparente que présentent les objets regardés au travers d'un prisme. La lumière réfléchie par ces corps étant décomposée à son passage dans le prisme, l'observateur attribue naturellement à l'objet lui-même les colorations diverses des rayons réfractés. Cette propriété constitue ce qu'on nomme *l'aberration de réfrangibilité*.

On est parvenu, en juxtaposant des prismes formés de substances inégalement dispersives sous des angles réfringents convenablement calculés, à éteindre ces irisations, fort gênantes dans les expériences d'optique. La lumière est alors réfractée, mais la déviation qu'elle éprouve n'est pas accompagnée de décomposition sensible. On appelle *achromatiques* les prismes combinés en vue de ce résultat.

La théorie indique qu'il serait nécessaire, pour obtenir un achromatisme parfait, d'employer autant

de prismes qu'il y a de rayons dans le spectre solaire. Il y aurait alors recomposition complète de la lumière blanche. Dans la pratique, on se contente de deux prismes choisis de façon à achromatiser les rayons rouges et les rayons jaunes en corrigeant leurs déviations respectives.

C'est Dollond, un opticien de Londres, qui a, le premier, en 1757, montré la manière de réaliser des milieux réfringents achromatiques. Un autre savant anglais, Hall, avait, dès 1733, résolu le problème, jugé insoluble par Newton, mais sans publier sa découverte.

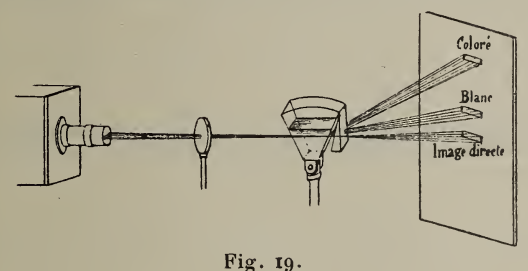



Fig. 19.

La figure 19 représente un des nombreux dispositifs qui peuvent être employés pour faire voir, dans les cours, comment fonctionnent les prismes achromatiques. La lumière émanée de la fente d'une lanterne à projection est dirigée, au moyen d'une lentille, sur un système de prismes dont le premier est un prisme à eau et le second un prisme en flint-glass. En faisant varier convenablement les angles réfrin-

gents de ces prismes, on voit, projetées simultanément sur l'écran :

1° Une image directe, blanche, de la fente, provenant des rayons qui n'ont pas rencontré les prismes;

2° Une seconde image, *blanche*, *déviée*, due à la lumière qui a traversé les deux prismes : on constate ainsi l'achromatisme de l'appareil;

3° Un spectre ordinaire, projeté par les rayons lumineux qui n'ont eu à passer que par le prisme à eau.

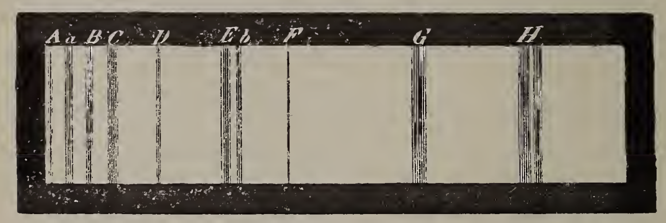



Fig. 19 bis.

Les brillantes couleurs du spectre solaire semblent, à un premier examen, se succéder, du rouge au violet, sans aucune solution de continuité. En réalité, il n'en est pas ainsi. Si l'on reçoit la lumière du soleil par une fente très étroite et qu'on en observe le spectre au moyen d'une lunette, on remarque bientôt, en effet, un très grand nombre de minces lignes obscures (fig. 19$^{bis}$), réparties inégalement dans toute la longueur du spectre, et perpendiculaires à la direction de cette longueur. Signalées, dès 1802,

par Wollaston, ces bandes obscures ont surtout été étudiées par Fraunhofer, dont elles ont reçu le nom. L'étude de la disposition de ces raies et des variations de leur coloration est devenue, grâce aux travaux du savant bavarois, le principe même d'un des plus merveilleux procédés de recherches dont dispose la science moderne : *l'analyse spectrale*. Nous ne pouvons que le signaler en passant, la question sortant du cadre de cet ouvrage.

Nous dirons seulement qu'occupant toujours la même place, ces raies servent de points de repère pour désigner telle ou telle région du spectre ; elles sont une sorte de portée naturelle sur laquelle est inscrite la gamme des couleurs.

## V

## Lentilles

Propriétés générales. — Aberrations. — Applications

On appelle lentilles des milieux transparents jouissant, en raison de la courbure de leurs surfaces, de diverses propriétés optiques. La figure 20 montre les principales formes adoptées. La première, *a*, est une lentille plan-convexe ; la seconde *b*, une lentille biconvexe ; la troisième *c*, s'appelle ménisque convergent ; la quatrième, *a'*, est dite plan-concave ;

la cinquième, *b'* biconvexe ; la sixième, *c'* enfin, est désignée sous le nom de ménisqne divergent.

De même qu'on peut considérer une sphère comme la forme-limite que prend un polyèdre régulier inscrit dans cette sphère lorsqu'on double indéfiniment le nombre de ses faces, de même, les lentilles peuvent être regardées comme résultant de la juxtaposition

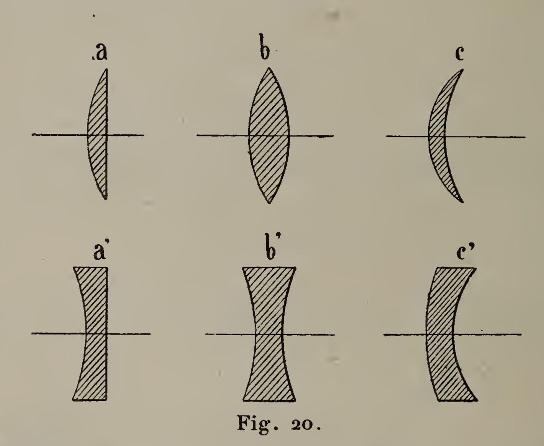



Fig. 20.

(a) Plan convexe (b) Bi-convexe (c) Ménisque convergent
(a') Plan concave (b') Bi-concave (c') Ménisque divergent

d'un nombre infini de petites prismes. Dans les lentilles *a*, *b*, et *c*, tous ces prismes auraient été réunis par leurs bases. Dans les lentilles *a'*, *b'* et *c'*, les prismes auraient, au contraire, été soudés par leurs sommets. Or, nous avons vu qu'un prisme tendait constamment à dévier vers sa base les rayons lumineux qui venaient le frapper. On con-

çoit dès lors que les lentilles *a*, *b*, *c* rapprocheront les rayons (fig. 21), tandis que les lentilles *a' b'* et *c'* les feront diverger au contraire (fig. 22). Selon que la partie centrale d'une lentille sera plus ou moins épaisse que ses bords, il y aura rapprochement ou écart par rapport à l'axe de la lentille.

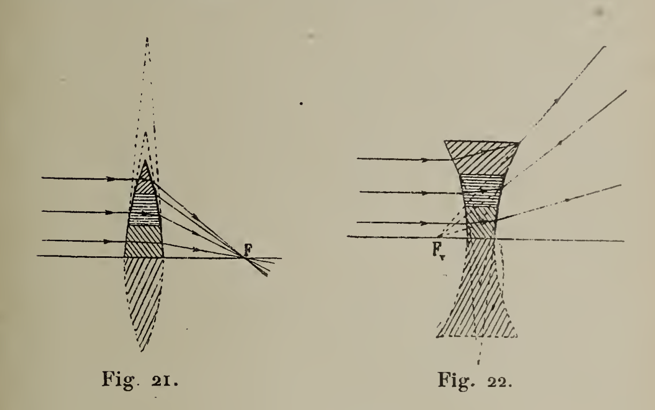



Fig. 21. Fig. 22.

L'expérience confirme l'exactitude de ces déductions. On constate en effet :

1° Que les lentilles de la première catégorie, une lentille biconvexe par exemple, réunissent en un faisceau convergent les rayons qui les frappent, d'où le nom de lentilles *convergentes* qui leur a été décerné ;

2° Que les lentilles du second type possèdent la propriété inverse, d'où leur appellation de lentilles *divergentes*.

L'un et l'autre système reçoivent des applications très diverses.

Soit une lentille biconvexe, recevant les rayons de lumière émis ou seulement renvoyés par un objet conformément aux lois de la diffusion, les rayons vont se réfracter en traversant la lentille. Plusieurs cas sont à considérer:

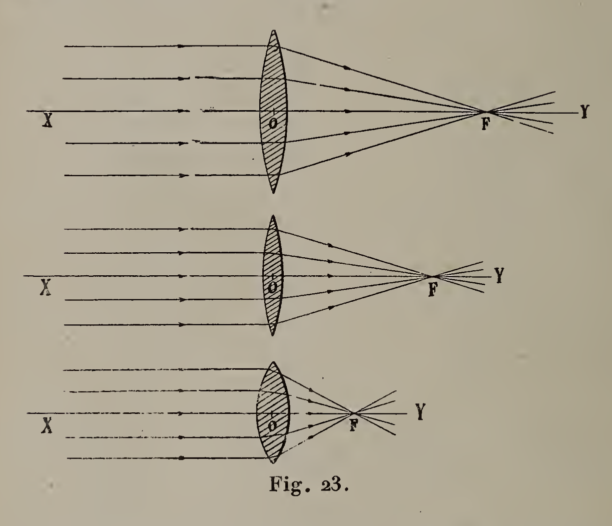


Fig. 23.

Si le corps est supposé placé à l'infini, les rayons qui en émanent peuvent être regardés comme parallèles entre eux. Si l'on dirige vers le soleil l'axe principal d'une lentille, les rayons solaires, sensiblement parallèles à cet axe, viendront, après réfraction, se croiser en un point que l'on nomme *foyer principal.* Dans cette expérience, la chaleur est concentrée au foyer

en même temps que la lumière, et chacun sait qu'un morceau d'amadou s'y enflammera aussitôt. Pour des lentilles de même substance, le foyer principal est d'autant plus rapproché que les surfaces courbes qui les limitent appartiennent à des sphères de plus petit diamètre (fig. 23).

L'expérience qui précède peut être renversée ; un corps lumineux étant placé au foyer principal d'une lentille, tous les rayons émis par lui seront, après réfraction, projetés dans une direction parallèle à l'axe de la lentille. Cette propriété a été utilisée notamment pour l'éclairage des phares (1).

A mesure qu'un objet se rapproche d'une lentille convergente, tout en restant placé au-delà du foyer principal, son image, d'abord très réduite, s'éloigne en grandissant (fig. 24). Elle est égale à l'objet et se trouve à la même distance de la lentille quand le corps observé n'est plus éloigné de la lentille que d'une longueur double de la distance focale (fig 24 bis). L'image formée est une image renversée *et réelle*. Cette dernière qualité permet de la recevoir sur un écran blanc.

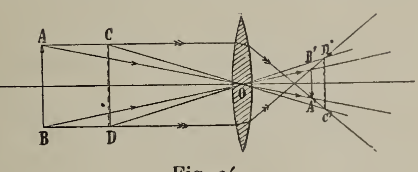


Fig. 24.

(1) V. *La conquête de la mer*, par L. Ernault et E. Jaubert.

Enfin, l'objet venant à se placer entre la lentille et son foyer principal, son image cesse d'être réelle. Mais on observe alors la formation d'une image *renversée virtuelle* et plus *grande que l'objet*, située du même côté que lui par rapport à la lentille. Envisagées principalement au point de vue de cette propriété, les lentilles convergentes portent le nom de *loupes* ou *microscopes simples*.

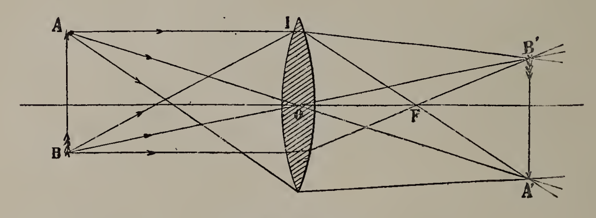



Fig. 24 bis.

Les lentilles biconcaves, ou, plus généralement, les lentilles divergentes ne donnent que des images virtuelles redressées et réduites, quelle que soit la distance de l'objet considéré. On emploie de pareilles lentilles notamment dans les lorgnettes de spectacle, dans la construction des lunettes destinées à remédier à la myopie, et comme *viseurs* dans certains appareils photographiques.

La netteté des images fournies par les lentilles n'est pas absoluc. On a cherché, par divers artifices, à parer aux principales imperfections signalées. Nous devons signaler quelqucs-uns des procédés usités.

Tout d'abord, les rayons émis d'un même point ne

vont pas rigoureusement converger en un foyer unique, après réfraction. Il se produit ce qu'on appelle le phénomène d'*aberration de sphéricité par réfraction*, dû à ce que le point de concours des rayons les plus voisins de l'axe est plus éloigné de la lentille que celui des rayons réfractés par les bords. L'emploi d'un diaphragme ne laissant de libre au passage des rayons qu'une ouverture de 10 à 12 degrés vers la partie centrale de la lentille, remédie à cet inconvénient

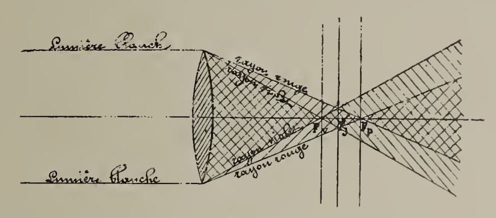



Fig. 25.

L'*aberration de réfrangibilité*, c'est-à-dire l'inégale déviation éprouvée par les rayons simples composant la lumière blanche à leur passage dans un milieu transparent, se produit avec les lentilles comme avec les prismes (fig. 25). On y obvie dans l'un et l'autre cas par la combinaison de deux ou plusieurs milieux inégalement réfringents, d'ordinaire le *crown* et le *flint*. L'obtention de l'achromatisme a une importance particulière au point de vue de la reproduction des couleurs par la photographie. Les diverses radiations n'ont pas, en effet, un pouvoir photogénique égal. Les rayons violets, moins brillants que les rayons jaunes, sont les plus actifs sur les sels métalliques employés. Or, comment, si l'image la plus satisfaisante pour l'œil n'est pas en même temps celle qui produira la meilleure impression sur les plaques sensibilisées, comment pourra-t-on reconnaître cette dernière et mettre au point voulu les appareils ?

Les lentilles ont encore bien d'autres défauts qu'on

corrige ou atténue tout au moins en en combinant plusieurs, centrées sur une même droite, appelée axe du système optique ainsi formé qui porte le nom de système convergent ou divergent selon que ses propriétés sont analogues à celles des lentilles convergentes et divergentes.

Si on remplace l'ouverture de la chambre noire (fig. 4) par une lentille ou un système convergent, on voit se peindre sur le mur opposé, en petit, l'image des objets extérieurs avec bien plus d'éclat que dans le cas d'un simple trou; seulement pour que l'image soit bien nette, il faut que le mur se trouve juste à une certaiue distance de la lentille: l'image est alors dite au point. C'est là le principe de la chambre noire des photographes.

Si, inversement, on éclaire fortement un dessin fait sur ce mur et que la chambre noire communique avec une chambre plus grande, obscure aussi, ou si on opère la nuit, on pourra recevoir sur un écran blanc placé à l'extérieur une image agrandie du dessin. C'est le principe de la lanterne magique et de la lanterne de projection.

---

# DEUXIÈME PARTIE

---

## Nature de la lumière.

## Les couleurs.

## DEUXIÈME PARTIE

# Nature de la lumière. — Les couleurs

## I

### Ondes liquides.

Nature de la lumière. — Théorie de l'émission. — Notions sur les ondes. — Ondes liquides.

Deux théories célèbres ont tour à tour prévalu au sujet de la nature même de la lumière.

D'après Newton, les corps lumineux seraient le siège d'une véritable émission, dans toutes les directions, de molécules élastiques, animées d'une prodigieuse vitesse. Ces particules en venant frapper notre œil, produisent une certaine impression, transformée en sensation lumineuse par les lobes optiques du cerveau. Elles se réfléchiraient sur les corps polis en vertu des lois ordinaires qui régissent le choc des corps élastiques, par exemple, les changements de route éprouvés en rencontrant la bande par les billes d'un billard. La réfraction s'expliquerait en admettant une attraction exercée par les

molécules des corps transparents sur les particules lumineuses. Enfin les dimensions différentes de ces mêmes particules suffiraient à expliquer les diversités de coloration et l'inégale réfrangibilité des rayons lumineux.

On pouvait objecter que des rayons composés de particules matérielles n'auraient pu s'entrecroiser librement comme le montrait l'expérience. Newton résolvait l'objection en répondant que rien, dans son système, n'obligeait à regarder les rayons lumineux comme une suite *continue* de particules. On sait, en effet, que l'impression de la lumière persiste pendant un dixième de seconde après cessation de la cause qui l'a provoquée. Si l'impression produite par les particules lumineuses se succède de dixième en dixième de seconde ; si, en d'autres termes, la rétine reçoit, en une seconde, le choc, à intervalles réguliers, de 10 des molécules émises par un corps lumineux, l'œil sera dans l'impossibilité de percevoir la discontinuité effective de ces chocs, l'observateur aura donc la sensation d'un éclairement ininterrompu. La lumière voyageant à raison de 300000 kilomètres par seconde, chaque particule lumineuse peut dès lors être distante de 30000 kilomètres de la précédente sans que notre œil y soit sensible. On comprend que les directions des rayons lumineux ainsi définis puissent se croiser sans encombre pour les particules matérielles qui les composent.

La théorie de l'*émission*, longtemps soutenue par des partisans autorisés, a été reconnue en opposition avec les faits, et elle est abandonnée aujourd'hui. A l'heure actuelle, on admet que toute sensation de lumière a pour cause première un *mouvement vibratoire* particulier des corps lumineux. Ce mouvement est transmis jusqu'à l'œil par l'intermédiaire d'une substance impondérable, l'*éther*, sorte de milieu universel qui pénètre, qui imbibe, en quelque sorte, tous les corps de l'univers. Le nerf optique, à son tour, communique cette vibration au cerveau qui la perçoit comme lumière.

Cette théorie, ébauchée par Descartes, reprise et développée par Huyghens et par Young, établie, enfin, d'une façon définitive, par le physicien français Fresnel, est désignée sous le nom de théorie des *ondulations*, par référence à un mode particulier de mouvement sur lequel nous devons insister.

Tout le monde a vu l'effet produit par une pierre jetée dans l'eau tranquille d'un bassin. Si l'on analyse attentivement cet effet, on voit que la pierre, plus lourde que l'eau, la déprime en s'enfonçant à l'endroit où elle tombe. Les molécules ainsi refoulées, agissant par compression sur les couches voisines, les pénètrent et les gonflent en quelque sorte de façon à former un bourrelet circulaire *en relief* autour du centre de dépression. Mais, la pierre continuant à s'enfoncer, le vide

produit derrière elle exerce un *appel* sur l'eau qui revient vers sa position primitive de tous les points du cercle soulevé. La tendance du liquide à reprendre son horizontalité s'ajoute à cette action, et, par suite de ces impulsions combinées, l'eau dépasse sa position d'équilibre : au point tout d'abord déprimé, une petite éminence s'est produite, en même temps qu'un nouvel anneau circulaire se dessinait *en creux* cette fois, à la surface du liquide. Les mêmes oscillations se répétant jusqu'à ce que toute la masse d'eau ait repris un niveau uniforme, on voit les anneaux circulaires, alternativement soulevés ou déprimés, gagner de proche en proche vers les bords du bassin, suivant des circonférences de rayon croissant qui ont pour centre commun le centre primitif d'ébranlement. Les anneaux en relief constituent ce qu'on appelle des *ondes condensées* ; les sillons en creux représentent ce qu'on nomme des *ondes dilatées*. Si un projectile de forme ACBD tombe au point O, il se formera autour de ce point une série d'anneaux, représentés en projection horizontale et en coupe sur la figure 24 ; l'anneau ACBDA'C'B'D' est une onde condensée ; l'anneau qui l'enveloppe A''C''B''D''A'C'B'D' une onde dilatée. L'ensemble de ces deux anneaux forme une onde *complète*.

On voit par notre explication qu'il y a, de couche d'eau en couche d'eau, simple communication de l'ébranlement ressenti sans qu'il y ait déplacement

des couches elles-mêmes. Dans un anneau tel que ACBDA'C'B'D' les molécules d'une tranche AA' sont animées tour à tour d'un double mouvement complexe (1) :

1° Mouvement de A vers A' et de bas en haut, quand l'anneau se soulève (onde condensée) ;

2° Mouvement de A' et A et de haut en bas, quand l'anneau se déprime (onde dilatée).

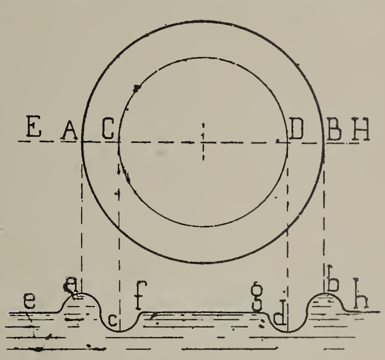


Fig. 26.

Mais ces molécules ne sont que balancées sur place, et ne quittent pas la tranche AA'. Il suffit, pour faire apparaître l'exactitude de ceci, de jeter sur l'eau un corps léger quelconque, un brin de paille par exemple. On constatera que ce flotteur s'élève et s'abaisse en suivant le mouvement des ondes, mais sans s'éloigner comme sans se rapprocher du centre d'ébranlement.

(1) On envisage en général ce mouvement comme un simple mouvement alternatif de bas en haut et de haut en bas. Il en résulte une explication incomplète qui ne peut être comprise du lecteur. Quand le lecteur la comprend tout de même, c'est encore plus fâcheux, car il la croit juste, et une explication incomplète est une explication fausse.

Envoyées assez loin de leur point central, les ondes liquides peuvent être regardées comme sensiblement planes. On aura une idée assez nette de leur mode de propagation en se rappelant l'effet d'un coup de vent sur un champ de blé : on voit une sorte de vague courir à la surface du champ, les épis s'abaissant et se relevant alternativement, sans, bien entendu, cesser de demeurer fixés à la même place.

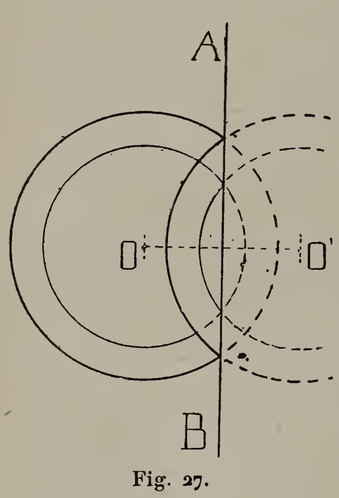


Fig. 27.

La distance parcourue par une onde liquide pendant l'unité de temps, une seconde par exemple, est ce qu'on appelle la *vitesse de propagation* du mouvement vibratoire. On entend par *longueur d'onde* la longueur *aa*'' d'une onde complète. L'*amplitude* d'une onde désigne la hauteur atteinte par la crête de cette onde au-dessus du niveau primitif de la surface.

Supposons qu'une onde circulaire, engendrée comme nous l'avons dit, vienne, en s'élargissant, se heurter à la paroi verticale d'un mur : un phénomène nouveau se manifeste : l'onde, arrivée contre la paroi, ne disparaît pas, ainsi qu'on pourrait le présumer :

elle revient sur sa route *en se réfléchissant,* et se montre transformée en une nouvelle onde circulaire, dite onde *réfléchie*, qui se comporte comme si elle émanait d'un centre d'ébranlement O' symétrique du véritable centre d'ébranlement O par rapport à l'obstacle (fig. 27).

Si la paroi heurtée n'est pas plane, il se produit, comme pour la diffusion des rayons lumineux par des corps non polis, une série de réflexions partielles qui, sous leur irrégularité apparente, obéissent au fond à la même loi.

Il arrive fréquemment que plusieurs systèmes d'ondes coexistent à la surface d'une même nappe liquide. On distinguera aisément, par exemple, à la surface d'un lac, les rides parallèles produites par l'action du vent, les ondes résultant du sillage d'un vaisseau, les anneaux circulaires produits par un oiseau qui plonge. Deux ou plusieurs des ondes ainsi formées peuvent se rencontrer. L'expérience et la théorie montrent qu'en pareil cas les ondes s'additionnent algébriquement au point de croisement, puis continuent leur route comme si chacune d'elles existait seule.

En vertu de cette loi, deux ondes égales et de sens directement contraires, AB et DC, arrivant à la rencontre l'une de l'autre de telle façon qu'à un instant donné la partie surélevée de la première doive occuper la partie déprimée de la seconde

(fig. 28, 1), la surélévation de l'une compensera exactement la dépression de la seconde, et la surface du liquide deviendra *plane* en cet endroit (fig. 28, 2). On dit alors qu'il y a *interférence* des deux ondes. Le phénomène s'observe aussi bien lorsque la rencontre a lieu entre les ondes d'un système et les ondes de ce même système réfléchies sur un obstacle, que lorsqu'elle s'opère entre ondes émanées de centres indépendants d'ébranlement.

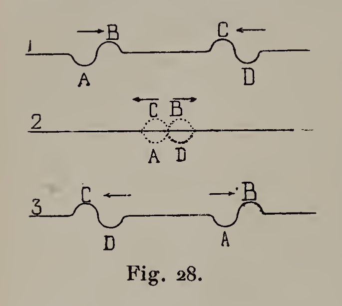


Fig. 28.

Après l'interférence des deux ondes, chacune d'elles, comme nous l'avons dit, continue sa course dans sa direction primitive (fig. 28, 3). Elles pourront donc interférer de nouveau, si une seconde rencontre a lieu dans les mêmes conditions que la première. Au cas où le choc aurait lieu entre deux anneaux en relief l'un et l'autre, l'élévation de l'onde résultante sera la somme des deux amplitudes. Elle représenterait leur différence (ou, ce qui revient au même, leur somme algébrique) si le heurt avait lieu entre une onde condensée et une onde dilatée.

## II

### Ondes sonores.

Le son est un mouvement vibratoire. — Mécanisme de sa propagation. — Interférences sonores.

Le son se transmet à travers l'air par un mécanisme de tous points analogue au mode de propagation des ondes liquides à travers une nappe d'eau.

Les expériences les plus simples permettent de se rendre compte que le son est dû à un mouvement vibratoire des particules d'un corps, mouvement transmis à l'oreille par une suite ininterrompue de milieux pondérables élastiques, l'air, le plus souvent. On voit très bien, à l'œil nu, les déplacements d'une corde vibrante qui prend aussitôt l'aspect d'un fuseau renflé. Le toucher suffit également à constater les mouvements d'un verre à boire qu'on vient de heurter ou d'un diapason qui résonne. Il est particulièrement aisé dans ce dernier cas de constater l'analogie frappante entre les vibrations sonores et les oscillations d'un pendule en avant et en arrière de sa position d'équilibre.

Il ne suffit pas qu'un corps vibre d'une façon quelconque pour qu'il y ait production d'un son ; il faut encore que ses vibrations s'exécutent avec une certaine régularité d'ensemble. Des vibrations

complètement indépendantes peuvent jouer un certain rôle dans la production de phénomènes calorifiques ou autres, mais non dans celle du son. On peut comparer les vibrations sonores à la manœuvre en rangs serrés d'une compagnie de soldats, tandis que les vibrations calorifiques, par exemple, ressembleraient aux mouvements irréguliers et précipités d'une foule en désordre.

Les ondes sonores, avons-nous dit, se propagent comme les ondes liquides. Si nous supposons un corps vibrant dans l'air, à chaque vibration complète de ce corps, la couche d'air en contact immédiat avec lui sera alternativement comprimée et dilatée. Nous aurons donc une série d'anneaux aériens correspondant respectivement aux bourrelets et aux sillons qui forment les ondes liquides. Dans chacun d'eux, les molécules d'air en vibration ne feront qu'osciller de part et d'autre d'une position centrale, la dénomination d'onde aérienne comme celle d'onde liquide désignant seulement le fait de la transmission en ligne droite des pressions ou des dilatations éprouvées par le milieu ambiant, et non pas le déplacement effectif des particules matérielles.

L'expérience bien connue des billes d'ivoire de Mariotte rend compte assez nettement de cette transmission. Soit une suite de billes en contact suspendues à des fils de soie et convenablement alignées. Si l'on écarte légèrement en A' la première de ces

billes A, et qu'on la laisse retomber sur celle qui la suit (fig. 29), on voit aussitôt la dernière des billes B se mettre en mouvement, sans que les autres aient éprouvé de dérangement appréciable. On comprend ce qui s'est passé : la bille choquée directement s'est comprimée, puis, se détendant comme un ressort, a transmis à la suivante la compression reçue. Il en a été ainsi jusqu'à la dernière boule, qui, repoussée par l'avant-dernière et trouvant le champ libre devant elle, s'est élevée jusqu'en B'.

Fig. 29.

La longueur d'une onde liquide, c'est-à-dire la distance entre les crêtes de deux anneaux successifs, peut varier beaucoup, depuis la simple ride produite par la chute d'une goutte de pluie jusqu'aux vagues profondes soulevées par l'ouragan. Il en est de même des ondes sonores : d'une manière générale, les sons aigus correspondant aux petites rides, les sons graves aux puissantes ondulations de l'Océan.

La longueur d'onde L d'une onde sonore désigne l'espace parcouru par cette onde pendant la durée T d'une vibration complète; si l'on désigne par V

la vitesse de propagation, autrement dit l'espace parcouru en une seconde par cette onde, l'espace parcouru en T secondes (qui n'est autre que la longueur d'onde L,), sera T fois plus grand, et l'on aura

$$L = V \times T.$$

Si l'on représente par N le nombre des vibrations sonores d'un corps par seconde, chaque vibration durant T secondes, il y a, pendant une seconde, $\frac{1}{T}$ vibrations, d'où :

$$N = \frac{1}{T}$$

La comparaison de cette égalité avec la précédente donne :

$$N = \frac{V}{L}$$

formule qui, traduite en langage ordinaire, s'énonce comme il suit :

*Le nombre des vibrations d'un corps sonore pendant une seconde est égal au quotient obtenu en divisant la vitesse de propagation des ondes sonores que ces vibrations engendrent par leur longueur d'onde.*

Lorsqu'un son correspond à un nombre de vibrations double du nombre de vibrations déterminées par un autre son, il est dit à l'*octave aiguë* de ce son. Si l'on représente par 1 le nombre de vibrations d'une note *ut* prise comme base fondamentale

d'une gamme musicale, on trouve, pour les intervalles de chaque note à la note de base, les rapports suivants :

| *Ut* | *Ré* | *Mi* | *Fa* | *Sol* | *La* | *Si* | *Ut* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $\frac{9}{8}$ | $\frac{5}{4}$ | $\frac{4}{3}$ | $\frac{3}{2}$ | $\frac{5}{3}$ | $\frac{15}{8}$ | 2 |

L'*intensité* d'un son dépend de l'amplitude des dilatations et des condensations successives de l'air provoqué par les vibrations du corps sonore. Sa *hauteur* dérive de la fréquence de ces mêmes vibrations ; elle est mesurée par le nombre de vibrations effectuées pendant l'unité de temps soit pendant une seconde. On conçoit, pour poursuivre cette comparaison, que des ondes liquides de même amplitude et de même hauteur puissent différer de forme : leur sommet peut être en pointe, arrondi, recourbé, etc. Il en est de même pour des ondes sonores de même intensité et de même hauteur : les différences de forme correspondent ici aux différences de *timbre*. L'oreille distingue parfaitement la note émise par un piano, de même la note rendue par un violon, une flûte, un hautbois ou tout autre instrument.

Quand une onde liquide glisse sur une eau calme sans éprouver aucune perturbation, on a une onde simple; mais, en général, comme nous l'avons dit au chapitre précédent, les ondes se produisent par

séries complexes. Le même phénomène se présente pour le son ; on peut, très exactement, se représenter l'air d'une salle de concert comme parcouru par une foule d'ondes sonores se croisant et s'entrecroisant en tous sens pour donner naissance aux sons complexes qui frappent notre oreille.

Les ondes sonores rencontrant un obstacle obéissent aux mêmes lois de réflexion que les ondes liquides. Lorsque l'obstacle est assez éloigné pour que le son réfléchi ne se confonde pas pour l'oreille avec le son entendu directement, on a le phénomène de l'*écho*. Si les ondes sonores, déjà réfléchies ou non, rencontrent un nouvel obstacle, le son est reproduit de nouveau, et on entend des échos multiples. L'identité de ces lois avec celles que nous avons exposées au sujet de la réflexion de la lumière devient évidente si l'on place une montre au foyer d'un miroir courbe disposé en face d'un autre miroir de courbure convenablement calculée pour que les ondes sonores, renvoyées par le premier miroir, soient concentrées au foyer du second. En plaçant l'oreille à ce foyer, on entend distinctement le tic-tac de la montre, et on ne peut l'entendre qu'en ce point.

Les ondes sonores émanant d'un centre O et les ondes provenant de la réflexion de ces ondes contre un obstacle AB peuvent, comme des ondes liquides, se superposer et interférer suivant les cas. Les vibrations réfléchies, en effet, ont pour centre virtuel

d'ébranlement le point O', symétrique de O par rapport à AB, et viennent à la rencontre des vibrations émanant de O. Qu'une onde dilatée rencontre une onde condensée, et de leur superposition résultera un son d'intensité minima, ou même d'intensité nulle : il y aura *silence* au point de croisement des vibrations dans l'espace. Le colonel Savart, en faisant vibrer un timbre en face d'un grand mur, et en promenant l'oreille sur la ligne perpendiculaire allant du timbre au mur, a constaté l'existence de pareils points où le son s'éteint complètement, tandis que dans d'autres il est énergiquement renforcé. Les premiers points s'appellent des *nœuds* et les seconds des *ventres*. Nœuds et ventres sont fixes, et placés à des distances de l'obstacle qui sont, pour les nœuds :

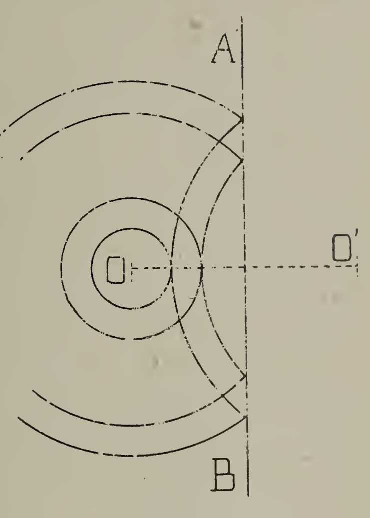


Fig. 30.

$$0 \qquad 2\frac{\lambda}{4} \qquad 4\frac{\lambda}{4} \qquad 6\frac{\lambda}{4}$$

et, pour les ventres :

$$\frac{\lambda}{4} \qquad 3\frac{\lambda}{4} \qquad 3\frac{\lambda}{4} \qquad 7\frac{\lambda}{4}$$

λ désignant la longueur d'onde du mouvement considéré.

Si l'onde, au lieu d'être sphérique, est plane, aux nœuds et aux ventres correspondent des plans nodaux et des plans ventraux séparés par les mêmes distances.

La production de telles ondes (dites stationnaires) dans les cas d'interférence d'une onde directe et d'une onde réfléchie se voit encore mieux en répétant l'expérience de Melde sur les vibrations transversales des cordes.

Un long cordonnet de soie blanche (fig. 31) est tendu, au moyen d'un poids P, entre une poulie fixe et un diapason vertical. Quand le diapason vibre, le cordonnet, successivement relâché, puis tendu, s'abaisse, se relève, s'infléchit à nouveau suivant un mouvement de vibration transversale. En prenant une corde d'une grosseur et d'une longueur convenable et en faisant varier sa tension, on arrive à une combinaison telle que la corde, animée d'un mouvement dont la période est double de celle du mouvement dont est animé le diapason, résonne à l'octave grave de la note émise par ce dernier. La corde présente alors l'aspect d'un long fuseau blanc d'une fixité parfaite. Si

l'on diminue maintenant le poids P, l'image de la corde se brouille en quelque sorte jusqu'à ce que la tension ne soit plus que le quart de la tension primitive : la corde se divise alors en deux segments oscillants ou ventres, V et V' (fig, 31,2) séparés par un nœud N absolument immobile. En bornant la tension au $\frac{1}{9}$ de ce qu'elle était tout d'abord, on aurait eu (fig. 31, 3) trois segments ventraux V, V' et V'', séparés par deux nœuds, N et N'. Ce sont là des exemples d'interférence entre les ondes directes lancées sur le cordonnet par les vibrations du diapason et ces mêmes ondes réfléchies sur la poulie fixe et revenant vers le diapason en sens inverse de leur direction primitive

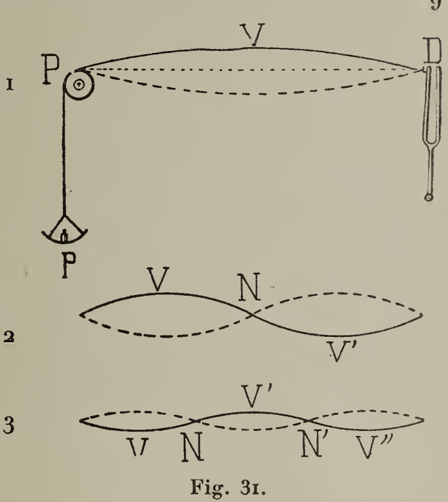


Fig. 31.

Un curieux appareil dû au génie inventeur d'Edison a montré d'une façon vraiment saisissante le mode de naissance des sons. Un son quelconque n'étant que la résultante de vibrations particulières impri-

mées à un milieu élastique tel que l'air, si l'on parvient à enregistrer les vibrations et à les reproduire à volonté, on reproduira le son lui-même. Le phonographe est un appareil qui réalise cette conception théorique. Un stylet mobile imprime, sous l'impulsion des vibrations sonores, une sorte de gaufrage plus ou moins profond sur une feuille d'étain convenablement disposée autour d'un cylindre que l'on fait tourner d'un mouvement uniforme. Le son ayant cessé, on remet l'appareil dans sa position primitive, on imprime au cylindre un nouveau mouvement, et la feuille d'étain, repoussant à son tour le stylet qui l'avait creusée, communique par son intermédiaire à l'air ambiant un mouvement vibratoire identique au mouvement primitif : il en résulte la reproduction identique du son lui-même. Le phonographe enregistre donc et reproduit les vibrations caractéristiques d'un son.

## III

### Ondes lumineuses.

Ondes lumineuses. — Interférences. — Les anneaux colorés de Newton.

A la suite d'expériences multiples dont la principale, relative aux phénomènes d'interférence produits par la lumière, sera décrite plus loin, un physicien

français, Fresnel, a mis hors de conteste la nature vibratoire des rayons lumineux. Seulement, ces mouvements qui, pour nos organes, se traduisent par la sensation que nous appelons : lumière, ne peuvent être analysés par notre œil. Ils nous sont *invisibles*, de même que les modes vibratoires particuliers qui correspondent à la chaleur et aux réactions chimiques (Infra, chap. V). Il y a une limite *minima* d'amplitude au-dessous de laquelle nos sens sont incapables de percevoir un mouvement. Cette limite, déterminée par le plus petit angle que notre rétine soit à même de dédoubler (angle de 20 secondes) correspond à un arc de $\frac{1}{10.000}$ sur une circonférence de rayon un. En d'autres termes, tout corps qui se déplace de moins de $\frac{1}{10.000}$ de la distance qui le sépare de notre œil est pour nous immobile : nous ne voyons pas un déplacement aussi faible. Nous ne nous apercevrions pas davantage d'une variation de même valeur survenue dans les dimensions d'un objet. Même en nous armant d'appareils optiques, la limite des mouvements perceptibles pour notre vue ne recule que bien peu.

Dans la conception de Fresnel, il existe, entre les molécules qui composent tout corps, solide, liquide ou gazeux, des espaces, variables avec la nature du corps, remplis d'un fluide particulier, d'une très faible densité et d'une élasticité presque absolue. Ce fluide, sorte de milieu universel, a reçu de

Fresnel le nom d'*éther* qui lui a été conservé (1). C'est par son intermédiaire que la lumière et la chaleur parviennent du soleil jusqu'à nous à travers les espaces célestes, qu'elles traversent le vide apparent de nos machines pneumatiques, les corps transparents ou diathermanes. Les molécules d'éther jouent dans cette propagation le rôle des billes d'ivoire dans l'expérience de Mariotte que nous avons rapportée précédemment (page 69) animées d'un mouvement de va-et-vient extrêmement rapide de part et d'autre de leur position primitive, une ondulation complète se composant des deux demi-ondulations déterminées par l'aller et le retour des particules en mouvement, les molécules d'éther se transmettent de l'une à l'autre, de proche en proche, dans toutes les directions, en ligne droite quand leurs vibrations ont lieu dans des milieux homogènes, l'impulsion reçue par la première d'entre elles.

La chaîne des molécules d'éther intervenantes pour une direction déterminée est ce que nous appelons un rayon lumineux.

Malgré leur énorme vitesse de propagation — *trois cent mille kilomètres par seconde* à travers

(1) L'étude des phénomènes électriques conduit également à admettre l'existence d'un pareil milieu. Nous n'avons pas besoin de dire que l'éther est *matériel;* de ce qu'un corps ne peut être perçu par nos organes, il ne résulte aucunement que ce corps n'existe qu'en tant qu'abstraction philosophique.

les espaces célestes (huit minutes pour venir du soleil à la terre) — les ondes lumineuses n'avancent, pendant la durée d'une vibration complète, que d'une quantité assez faible pour qu'on ne l'apprécie qu'en millièmes de millimètres ou *microns*. On se réfère, au contraire, au mètre, unité et mesure ordinaire, pour mesurer la longueur d'onde d'une vibration sonore.

Les ondes lumineuses sont des ondes sphériques, comparables chacune à un ballon qui se gonflerait assez vite pour que son rayon s'accrût de 300,000 kilomètres par seconde. Il n'y a guère, quant au mode de propagation entre une onde lumineuse, une onde sonore et une onde liquide, que des différences de degré. Ainsi, nous voyons le plus souvent directement les ondes liquides; l'onde lumineuse ne peut être reconnue que par la théorie qui y trouve l'explication de certains phénomènes. En raison de la différence des milieux, dans l'eau, peu élastique et relativement dense, le mouvement a une faible vitesse, ne se propage pas loin et diminue rapidement d'intensité; dans l'éther, il atteint une rapidité prodigieuse et traverse des distances énormes sans diminuer sensiblement d'intensité vibratoire. Les ondes liquides vibrent transversalement, c'est-à-dire perpendiculairement à leur direction de propagation; il en est de même de la corde d'un violon sous l'archet (1);

(1) Le son peut être produit par des vibrations longitudinales comme par des vibrations transversales. Tel est le

les vibrations lumineuses sont toujours des vibrations transversales. Enfin, les ondes lumineuses peuvent interférer : au point de croisement, la lumière ajoutée à la lumière produit l'obscurité, de même que le son additionné au son se résout en silence, ainsi que nous l'avons écrit au chapitre précédent. Nous devons insister sur ceci : c'est précisément sur les phénomènes d'interférence que repose la découverte de M. Lippmann relative à la reproduction directe par la photographie des objets colorés.

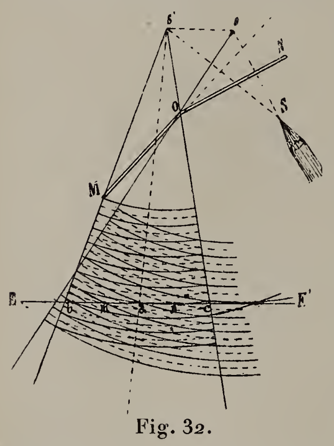


Fig. 32.

Si l'on reçoit sur deux miroirs-plans disposés côte à côte de façon à former un angle très obtus, NOM, une lumière monochromatique, rouge, par exemple, et que l'on reçoive simultanément sur un écran les deux faisceaux réfléchis, on voit, dans toute la partie où ces faisceaux empiètent l'un sur l'autre, apparaître des bandes ou franges alternativement sombres et brillantes. Ces bandes disparaissent si l'on arrête la

son émis par une corde quand on la frotte, dans le sens de la longueur, avec un morceau d'étoffe saupoudré de colophane.

lumière qui tombe sur l'un des miroirs, comme le Père Grimaldi l'avait déjà observé dès 1663. Elles sont donc bien dues à la juxtaposition des rayons lumineux.

Avec la lumière rouge, les franges sont alternativement rouges et noires. Elles sont bleues et noires avec la lumière bleue. Leur largeur varie d'ailleurs avec chaque couleur simple. Elle est plus grande dans le rouge que dans le jaune, et plus grande dans le jaune que dans le bleu.

De même que pour les ondes sonores, les phénomènes d'interférence peuvent se produire entre les ondes lumineuses directes et les mêmes ondes lumineuses réfléchies.

Soit une lentille plan convexe, à très long foyer, LL' qui touche un plan AB en un seul point C de sa convexité. Si l'on fait tomber de la lumière monochromatique rouge ou bleue, par exemple, sur le système, on aperçoit une série d'anneaux circulaires alternativement brillants ou obscurs. Ces anneaux vont en se rapprochant au fur et à mesure qu'ils s'éloignent de leur centre, représenté par une tache noire. Si, au lieu de regarder les lentilles par réflexion, on les observe par transparence, c'est-à-dire en interposaat le système entre l'œil et la lumière, un phénomène analogue

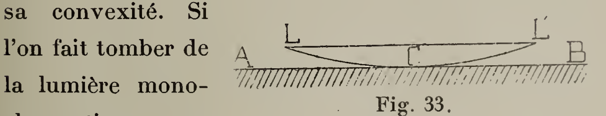


Fig. 33.

apparaît ; mais le point central est brillant, et l'ordre des anneaux qui l'entourent est interverti.

Newton a mesuré les diamètres des anneaux et découvert les lois de leur formation. Les carrés des diamètres des anneaux sombres croissent comme les nombres 0, 2, 4, 6... et les carrés des diamètres brillants comme les nombres impairs 1, 3, 5, 7... Les épaisseurs de la lame d'air comprise entre les deux lentilles aux points où se développent les anneaux sont proportionnelles aux carrés des diamètres de ces anneaux. Elles augmentent d'autant plus, comme les diamètres des anneaux eux-mêmes, que la lumière simple qui éclaire le système est moins réfrangible.

Fresnel, le premier, a donné l'explication théorique de ces phénomènes.

Soit une lame mince d'air, par exemple, comprise entre deux corps transparents, que nous supposons, pour plus de simplicité, limités par des surfaces parallèles HH' et KK'. En arrivant en A, un rayon lumineux tel que SA, se divise, comme nous l'avons vu, en deux portions distinctes, l'une réfléchie suivant $AS_1$, l'autre réfractée suivant AB. Cette seconde portion, rencontrant en HH' une nouvelle surface réfléchissante, la traverse en partie et revient en partie suivant BA. Là, nouvelle subdivision de la lumière ; un rayon lumineux tel que A'S', rentre dans le premier milieu, suivant une

direction A'S' parallèle $AS_1$. Il a alors sur le rayon $AS_1$, un retard mesuré par la ligne brisée ABA', longueur du chemin que A'S' a dû parcourir par $AS_1$.

Si ce retard ABA' est précisément égal à une demi-longueur d'onde ou à un multiple impair de la demi-longueur d'onde des vibrations lumineuses envisagées, A'S' sera dans les conditions nécessaires et suffisantes pour interférer avec un rayon qui tomberait en A' parallèlement à SA et se réfléchirait par suite, selon A'S'. Si le retard est égal à un multiple pair de la même quantité, il y aura, au contraire, addition des intensités des rayons réfléchis suivant A'S'.

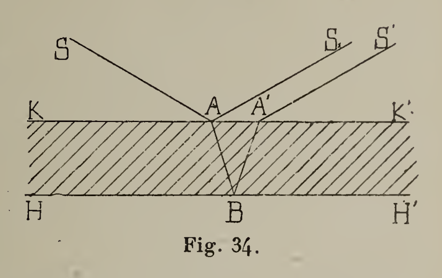


Fig. 34.

Tel est, en effet, le phénomène que l'expérience a permis de constater. Les franges sont rectilignes, comme dans le cas de deux miroirs, et non pas circulaires comme dans le cas des anneaux entre deux lentilles observés par Newton ; mais si la forme des franges dépend de celle des surfaces, leur mode de formation est évidemment le même dans tous les cas particuliers.

## IV

### Les couleurs dans la théorie des ondulations (1).

Interférences et anneaux de Newton en lumière blanche.

Si l'on répète l'expérience des miroirs de Fresnel ou celle des anneaux de Newton, décrites au chapitre précédent, avec de la lumière blanche, on constate que la largeur des franges varie avec chacune des couleurs simples qui composent la lumière blanche. Cette largeur dépendant, d'autre part, de la longueur d'onde des vibrations colorées diverses étudiées, Fresnel a pu, en mesurant avec précision l'intervalle des franges, en déduire les longueurs d'ondes des différentes couleurs simples.

Ces longueurs sont, *en millionièmes de millimètres*, mesurées par les chiffres suivants :

| | |
|---|---|
| Rouge. . . . . . . . . . . | 620 |
| Orange . . . . . . . . . . | 583 |
| Jaune . . . . . . . . . . . | 551 |
| Vert. . . . . . . . . . . . | 512 |
| Bleu . . . . . . . . . . . | 475 |
| Indigo. . . . . . . . . . . | 449 |
| Violet . . . . . . . . . . . | 423 |

(1) Nous engageons fortement les lecteurs qui désireraient avoir des notions complètes sur la théorie des couleurs, à lire l'intéressant ouvrage de *O. N. Rood* : Théorie scientifique des couleurs. Paris, Alcan.

La vitesse de la lumière, c'est-à-dire l'espace franchi en une seconde par un rayon lumineux, étant connue, en divisant le chiffre qui représente cette vitesse par la longueur d'onde de chacune des couleurs simples du spectre, on obtient évidemment le nombre des vibrations qu'exécute par seconde un rayon lumineux de coloration donnée.

On a trouvé ainsi les chiffres vertigineux du tableau ci-dessous :

| | |
|---|---|
| Rouge. . . . . . . . . . | 497.000.000.000.000 |
| Orangé . . . . . . . . . | 528.000.000.000.000 |
| Jaune. . . . . . . . . . | 529.000.000.000.000 |
| Vert. . . . . . . . . . . | 601.000.000.000.000 |
| Bleu. . . . . . . . . . . | 648.000.000.000.000 |
| Indigo. . . . . . . . . . | 686.000.000.000.000 |
| Violet. . . . . . . . . . | 728.000.000.000.000 |

C'est donc par *millions de millions* que se comptent ces vibrations dont le nombre détermine la coloration d'un rayon lumineux de la même façon que le chiffre des vibrations détermine la place d'un son dans la gamme musicale (1).

(1) En poursuivant plus loin cette comparaison entre la gamme et les colorations, on voit que le rouge correspondrait aux notes graves et le violet aux notes les plus aiguës. Un physicien a imaginé de construire d'après cette donnée un piano optique qui permettrait d'ouïr et de combiner les colorations comme le piano ordinaire le fait pour les notes musicales. L'appareil a eu un succès momentané de curiosité et est tombé en oubli. Les jouissances de la vue et celles de l'ouïe ne sont pas de nature à permettre une telle assimilation.

Les franges, quand on opère avec la lumière blanche, ne sont plus alternativement obscures ou brillantes : elles se présentent irisées des plus belles couleurs du spectre. La frange centrale seule reste blanche ; pour les autres, l'irisation va en croissant, le bleu étant tourné du côté de la frange centrale et le rouge du côté opposé, jusqu'à une certaine distance où l'œil ne distingue plus qu'une teinte blanche uniforme. Les franges n'en continuent pas moins à se succéder, quoique invisibles pour nous, car la teinte blanche n'accuse plus, au spectroscope, la même composition que la lumière émise par la source employée. On a créé, pour la distinguer du blanc ordinaire, la dénomination de *blanc d'ordre supérieur*.

La présence de ces irisations provient de ce que la lumière blanche est une lumière complexe, comprenant un certain nombre de couleurs simples qui possèdent chacune leur longueur d'onde caractéristique. Quand deux faisceaux de lumière blanche interfèrent, la production de franges s'opère, pour chaque rayon simple comme s'il existait seul ; et de la superposition de ces franges résultent les irisations signalées.

Dans l'expérience de Newton, la lame mince transparente où s'opèrent les interférences est la couche d'air interposée. On peut faire varier la nature de cette lame sans que le phénomène cesse de se manifester. Dans le cas particulier d'une goutte

d'eau interposée entre la lentille et le plan, les anneaux sont plus serrés. Le troisième anneau d'interférence dans l'air coïnciderait, comme position générale, avec le quatrième anneau d'interférence dans l'eau (fig. 35).

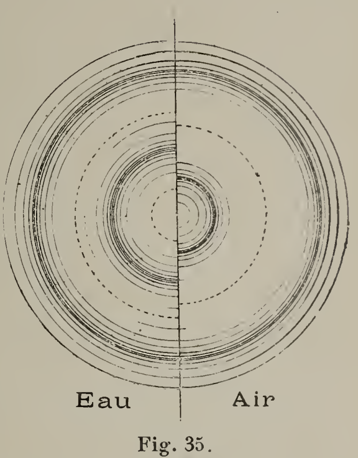



Fig. 35.

L'action des lames minces sur les vibrations lumineuses sera avantageusement comparée à celle des tuyaux fermés sur les vibrations sonores. On démontre en faisant vibrer la colonne d'air contenue dans un tuyau fermé, que le tuyau renforce certains sons, et l'on a pu calculer la relation qui existe entre la longueur du tuyau et la longueur d'onde des sons renforcés. De même, une lame mince réfléchit certaines couleurs, celles — et celles-là seules — dont la longueur d'onde est liée à l'épaisseur de la lame par un rapport déterminé : la lame fonctionne donc comme une espèce de *résonnateur de lumière*.

Il importe de bien retenir que, dans l'expérience de Newton, la lentille et le plan n'interviennent que d'une façon en quelque sorte mécanique, en

tant que surfaces réfléchissantes et pour réduire la lame transparente d'air à l'épaisseur excessivement faible requise pour la production des anneaux colorés. Surface réfléchissante et très faible épaisseur sont les seules conditions nécessaires, la transparence résultant, nous l'avons dit, de l'amincissement même des lames observées. La meilleure preuve de ces propositions est donnée par le nombre considérable d'objets naturels qui, sans l'intervention d'aucun appareil, présentent d'aussi belles teintes que les anneaux colorés, par suite également de l'interférence des rayons directs incidents avec ces mêmes rayons réfléchis par l'objet. L'exemple le plus familier est celui des bulles de savon.

Lorsqu'on gonfle une de ces bulles, — récréation bien connue des enfants — on voit d'abord apparaître sur la bulle l'image réfléchie des objets extérieurs. En continuant avec précaution l'opération, à mesure que la bulle grossit et que, par suite, la pellicule d'eau dont elle est formée devient plus mince, des teintes vertes et roses apparaissent, de plus en plus brillantes, et remplacées bientôt par des nuances bleues, orangées ou pourpres.

Si la bulle a la chance de durer encore, sa partie supérieure commence à montrer des glacis d'un jaune fauve tournoyant au milieu de teintes plus brillantes. L'amincissement des parois est alors extrême. On a pu, soit par des méthodes électriques, soit par

des méthodes optiques fondées précisément sur la théorie des anneaux de Newton, mesurer l'épaisseur de la lame liquide qui a été trouvée de 121 dix-millièmes de millimètre.

Les irisations observées sur de très vieux fragments de verre, la nuance bleue de certains aciers, les teintes fugitives qu'une goutte d'éther jetée dans une cuvette d'eau détermine sur le liquide, sont également dues à des franges d'interférence des rayons lumineux dans la très mince couche transparente qui recouvre le corps considéré. Même cause également pour ces nuances chatoyantes du plumage qui font de certains oiseaux des merveilleux bijoux ailés, comme les colibris, — pour les couleurs métalliques du corselet de certains coléoptères, — pour tant d'autres parures naturelles encore dont tout l'art du peintre est impuissant à rendre l'éclat magique ! Seule la plaque photographique saisit et peut reproduire fidèlement, comme nous le verrons plus loin, jusqu'aux jeux les plus capricieux et les plus fantaisistes en apparence de la lumière.

Les colorations des milieux opalescents, la fluorescence, qui n'est qu'une phosphorescence momentanée de certains corps, les dessins lumineux observés en regardant à travers un microscope spécialement construit des lames minces de certains minéraux (polarisation chromatique) : tous ces phénomènes se rattachent à une cause unique : retards variables

subis par des ondes lumineuses, interférence des rayons entrecroisés.

## V

### Identité des radiations calorifiques, lumineuses et chimiques.

Spectres lumineux, calorifique et chimique. — Phosphorescence. — Fluorescence.

La chaleur, comme la lumière, se propage à travers le vide apparent. C'est ainsi que l'une et l'autre nous arrivent du soleil en traversant les espaces planétaires, vides de toute matière pondérable.

Comme la lumière, la chaleur se réfléchit, se réfracte, et peut interférer. Si, au moyen d'un prisme et d'une lentille de sel gemme disposés comme il a été dit plus haut, on projecte le spectre d'une source à la fois lumineuse et calorifique, telle qu'un corps échauffé jusqu'à l'incandescence, on peut, à l'aide d'un thermomètre spécial basé sur l'électricité, d'une pile thermo-électrique ou mieux d'un bolomètre (1) constater qu'il y a de la chaleur rayonnante dans toutes ces régions du spectre. Pour la chaleur rayonnante comme pour la lumière, il y a

(1) Instrument basé sur les variations que la chaleur fait subir à la résistance électrique d'un fil métallique.

donc eu *dispersion*, et il existe un spectre calorifique de même qu'un spectre lumineux. Le spectre calorifique s'étend même au-delà du rouge et du violet et dépasse par suite des deux côtés le spectre visible pour l'œil. Les rayons calorifiques des diverses parties du spectre sont indécomposables par leur passage à travers un nouveau prisme. Ce sont donc des rayons simples, comme les rayons lumineux correspondants.

L'étude attentive du spectre révèle en lui, à côté de ses propriétés lumineuses et calorifiques, une troisième catégorie de propriétés que l'on a pu nommer propriétés chimiques.

On sait qu'un grand nombre de substances, pour ne pas dire toutes, s'altèrent à la lumière du jour. Un papier imprégné d'azotate, de chlorure ou d'iodure d'argent, exposé au soleil, noircit. Le mélange à froid de chlore et d'hydrogène se transforme en acide chlorhydrique. Beaucoup d'étoffes et de papiers colorés pâlissent à la longue par suite d'une altération chimique de la matière colorante. On a dû étudier spécialement l'action de la lumière sur les couleurs d'aquarelle pour se servir exclusivement dans les tableaux de celles qui sont peu ou qui ne sont point sujettes à s'altérer.

Les mêmes phénomènes s'observent avec un spectre pur obtenu par décomposition de la lumière blanche. On reconnaît toutefois que les diverses régions du

spectre exercent leur action avec une intensité variable, le maximum d'effet apparaissant dans la partie indigo voisine de la raie G. Les radiations jaunes, rouges, et infra-rouges sont presque sans activité. La région du violet, celle de la teinte gris-lavande que certains observateurs distinguent au-delà du violet (1) déterminent par contre d'énergiques réactions. Une feuille de papier recouverte de chlorure d'argent et placée dans un spectre réel noircit à partir du vert jusqu'à l'extrémité de l'ultra-violet, déterminant ainsi l'étendue de ce qu'on a nommé *spectre chimique.* — On a pu constater, au reste, que les rayons chimiques se réfléchissaient, se réfractaient et interféraient comme le rayon calorifique ou lumineux.

Les raies obscures, précédemment signalées dans le spectre lumineux, ont leurs analogues dans chacune des deux autres sortes de spectre. Dans le spectre calorifique, la pile d'un thermo-multiplicateur de Melloni indique la présence de bandes froides ; et, si l'on provoque l'activité chimique du spectre en y plaçant un papier au chlorure, les raies obscures du spectre visible ressortent blanches sur le papier. Il y a de ces raies dans l'ultra-violet et dans

(1) Pour rendre manifeste à tous l'existence de ce prolongement du spectre visible, il suffit d'y placer un papier imbibé de sulfate de quinine qui s'y éclaire aussitôt d'une lueur violette.

l'infra-rouge comme dans les teintes intermédiaires. Les raies obscures de l'ultra-violet peuvent être rendues visibles en recevant cette partie du spectre sur un écran phosphorescent ou en les regardant à travers un oculaire fluorescent ; on peut facilement les fixer par la photographie. Quant à celles de l'infra-rouge, Becquerel a pu les faire apparaître dans des phénomènes de phosphorescence ; Abney en a photographié un certain nombre, et la pile thermo-électrique les indique.

Si l'on ajoute aux observations qui précèdent qu'un rayon lumineux, un rayon calorifique et un rayon chimique pris dans la même région du spectre ne peuvent être séparés l'un de l'autre par aucun moyen connu, si l'on tient compte de la coexistence dans la partie moyenne du spectre, des trois pouvoirs lumineux, calorifique et chimique ; si l'on se rappelle, enfin, qu'il résulte des expériences de MM. Jamin et Masson, que l'un de ces pouvoirs variant d'intensité, les intensités respectives des deux autres varient toujours selon un même rapport, on arrive à cette conclusion naturelle : effets chimiques, calorifiques et lumineux ne sont que des manifestations diverses suivant les corps impressionnés, d'un seul et même agent : la *radiation*.

Plaçons-nous dans une chambre obscure, présentant sur l'une de ses parois une ouverture exposée à l'action d'une source lumineuse, du soleil par

exemple. Pour une position convenable de l'œil, la radiation le frappera, impressionnant le nerf optique qui transmet l'ébranlement reçu au cerveau, où cet ébranlement se transforme en la seule sensation correspondante aux lobes excités : la sensation lumineuse. Dans ce cas, nous appelons la radiation *lumière*.

Si maintenant nous mettons la main dans la position tout à l'heure occupée par l'œil, le même agent en échauffe la surface et le réseau de nerfs diffus qui se trouvent sous la peau transmet au cerveau l'impression : d'où sensation calorifique. Dans ce cas, nous appelons la radiation *chaleur*.

Si, enfin, nous substituons à la main un papier imbibé d'un sel d'argent, ce papier noircira plus ou moins vite, sous l'action chimique déterminée par les rayons. Dans ce cas, nous appelons la radiation *actinisme*.

Le même faisceau de lumière frappant d'autres substances y eût déterminé d'autres effets. Certains corps, le diamant, le sulfure de calcium ou de baryum, par exemple, après avoir été éclairés par la lumière solaire ou par l'arc électrique, paraissent lumineux dans l'obscurité : c'est la *phosphorescence*, excitée surtout par les radiations les plus réfrangibles. La nature de la couleur ainsi réfléchie dépend de la nature du corps ; elle est, dans tous les cas, composée de radiations moins réfrangibles que celles qui l'ont excitée (loi de Stokes). On peut avoir ainsi une série

de teintes charmantes, les unes brillant d'une lueur violette, les autres d'une lueur orangée ou jaune. On voit aussi paraître des bleus tendres ou encore des teintes rouges faisant, dans l'obscurité, l'effet de charbons ardents.

Au lieu de la phosphorescence, la lumière eût pu déterminer, sur une substance convenablement choisie, la *fluorescence* qui n'est, comme nous l'avons dit, qu'une phosphorescence très brève. Les corps fluorescents non seulement renvoient par diffusion la lumière reçue, mais ils reflètent encore une autre lumière, composée de radiations moins réfrangibles, comme s'ils jouissaient de la propriété d'accroître la longueur d'onde de la radiation incidente. C'est ainsi que le bisulfate de quinine, brillant dans la région ultra-violette du spectre, nous rend perceptible cette région, de même, un verre d'uranium prend instantanément une teinte d'un vert violacé éclatant si l'on fait tomber sur ce verre les rayons violets d'un spectre. Éclairés par la lumière du jour, les corps fluorescents présentent ainsi à leur surface une teinte laiteuse, due à la lueur propre qu'ils émettent. Tandis que seuls les corps solides sont phosphorescents, il y a beaucoup de liquides fluorescents. Telles sont les solutions de sulfate de quinine dans l'acide sulfurique, celles d'esculine ou de fluorescéine, etc.

Cette diversité même des effets que nous venons

de rappeler semble fournir un argument sérieux contre l'unité de cause des phénomènes observés. Il n'y a aucune analogie entre une sensation calorifique et une perception de lumière, il n'y en a pas davantage entre la décomposition d'un sel d'argent et la fluorescence. — Sans contester cette diversité, on répond que la nature d'un effet dépend bien plus encore de l'organe ou de l'appareil impressionné que de la nature de la cause agissante.

Une autre objection, c'est que le spectre calorifique déborde des deux côtés le spectre lumineux. Dans l'infra-rouge et dans l'infra-violet, il y a chaleur, et il n'y a pas lumière. — La difficulté se résout aisément : il n'y a pas lumière, parce que les milieux de l'œil sont opaques pour les radiations en jeu, et ne les laissent pas parvenir jusqu'à la rétine. La suppression du cristallin, comme on la fait, notamment dans l'opération de la cataracte, permet de voir plus loin dans le violet qu'avec l'œil normal. Une nouvelle démonstration résulte de l'expérience suivante : si l'on place sur le trajet de rayons donnant un spectre réel une cuve en verre mince renfermant les milieux transparents d'un œil de bœuf, le bolomètre n'accuse plus de chaleur dans la région infra-rouge. Il continue à en accuser si l'on interpose la cuve vide.

On est donc fondé à considérer l'œil comme constitué de telle sorte qu'il soit seulement sensible

aux radiations moyennes du spectre. Le noir de fumée, le papier aux sels d'argent... peuvent être sensibles à d'autres. Les propriétés calorifiques, lumineuses ou chimiques des rayons ne sont, pour employer l'expression philosophique, que des propriétés subjectives, c'est-à-dire des propriétés existant par rapport au *sujet* qui les observe, et non par rapport à l'*objet* qui en provoque les manifestations. La radiation possède une certaine force d'action, susceptible de se transformer diversement, selon les cas, soit en chaleur soit en lumière, soit en une réaction chimique. Cette force d'action, au sens le plus général du mot, est ce qu'on appelle l'*énergie*.

Nous allons insister sur cette importante notion.

## VI

### De l'énergie. — La lumière est une forme de l'énergie.

Matière et Énergie. — Transformations de l'Énergie.

Le monde extérieur se manifeste à nous sous deux formes très distinctes : la *matière* et l'*énergie*. La matière forme la partie pondérable tangible des choses et des êtres; l'énergie est la source du mouvement qui anime cette matière. En réalité, l'énergie et la matière n'existent jamais séparément dans l'univers. L'éther, intermédiaire et agent des plus

subtiles comme des plus puissantes manifestations de l'énergie, n'est qu'une forme de la matière elle-même.

Etymologiquement, le mot énergie signifie travail intérieur, travail emmagasiné, et susceptible d'être utilisé, le cas échéant. Cause de tout mouvement et, peut-être, principe de toute vie, c'est l'énergie qui, à travers nos organes des sens, se transforme en sensation, différente selon l'organe impressionné ; et c'est d'après les perceptions diverses qui en résultent que nous avons classé les phénomènes de la nature en : mécanique, capillarité, électricité, acoustique, chimie, physiologie..., etc. Malgré leurs diversités apparentes, tous ces phénomènes sont reliés les uns aux autres, soit par des relations directes de cause à effet, soit par des rapports étroits d'analogie. Ainsi conçue comme l'étude des relations communes à tous les phénomènes du monde matériel, la science de l'énergie, ou Énergétique, comme on a proposé de l'appeler, embrasse et résume toutes les sciences physiques et naturelles particulières (1).

(1) Nous conseillons à ceux qui désireraient approfondir les idées contenues dans le présent chapitre la lecture des ouvrages suivants :

*Colson*, capitaine du génie. — L'Énergie et ses transformations. Paris, Carré, 1889 ;

*Le Chatelier*. — La Science de l'Énergie. Revue scientifique, n° du 26 mars 1894 ;

*A. Nodon*. — La théorie de l'énergie et ses applications (Revue générale des sciences, numéro du 15 novembre 1893).

Ce chapitre a d'ailleurs été composé surtout d'après ces sources.

Suspendons au-dessus du sol un corps plus lourd que l'air : ce corps possédera une certaine énergie, il sera capable de produire un certain travail. Pour s'en assurer, il suffit de supprimer l'obstacle qui s'opposait à sa chute. Le corps tombe-t-il librement? Il n'en aura pas moins à produire le travail nécessaire pour surmonter le frottement et le refoulement de l'air. La puissance de travail du corps est encore plus manifeste si nous le supposons fixé à un fil enroulé sur une poulie et portant un poids plus faible à son autre extrémité : on voit le corps descendre vers le sol en faisant remonter le poids plus faible. Il a ainsi produit le travail nécessaire pour vaincre la résistance de l'air, les frottements du fil sur la poulie et de la poulie elle-même sur ses tourillons, et enfin le travail nécessaire pour élever le poids plus faible. Cette puissance de travail du corps suspendu représente ce que nous appelons son énergie; elle est égale au travail même qu'il a fallu dépenser pour élever le corps à la hauteur où il est attaché. L'effort exercé pendant l'élévation du corps représente pour ce corps une puissance virtuelle de travail qui trouve à s'exercer au moment où le corps tombe sur le sol.

En distinguant ces deux moments de suspension et de chute, on est amené à considérer deux formes distinctes de l'énergie : l'énergie *passive* ou *potentielle*, et l'énergie *active* ou *dynamique*. La première est celle que possède

un corps lorsque, comme le poids suspendu dont nous parlions ou comme un ressort bandé prêt à se détendre quand on l'abandonnera à lui-même, il est susceptible de fournir un certain travail. La seconde est l'énergie en action, caractérisée, au contraire de l'énergie potentielle, par l'état de mouvement des corps qui en sont doués.

Tous les phénomènes observables de la nature se résument en une série de transformations de l'énergie. La plupart de ces transformations ont pu être reproduites par l'expérience.

C'est ainsi que le travail mécanique se transforme en chaleur : un morceau de fer martelé sur l'enclume s'échauffe. Réciproquement, la chaleur peut se transformer en travail mécanique : telle est la chaleur produite par la combustion du charbon dans les machines à vapeur, qui, métamorphosée en mouvement, fait marcher l'appareil; telle est encore la chaleur dégagée dans la détonation d'un corps explosif.

On peut passer de l'énergie mécanique à l'énergie lumineuse; mais il y a toujours en même temps, du moins dans les exemples connus, production d'énergie calorifique. Inversement, l'énergie lumineuse se transforme parfois en énergie mécanique. Tel est le principe du radiomètre de Crookes, dans lequel un petit moulinet très léger, formé de lamelles de mica dont une face est argentée et l'autre recouverte de noir de fumée, et enfermée dans une ampoule de verre où l'on a fait le vide, tourne quand on l'expose à une lumière suffisante. Telle est encore la production de sons dus à l'énergie mécanique qui se développe quand on fait tomber sur la surface d'un corps de la lumière d'une manière intermittente (radiophonie) (1)

(1) On sait que les sons proférés par la légendaire statue de Memnon avaient une cause analogue. Les premiers rayons du soleil tombant sur la statue échauffaient l'air contenu dans les crevasses de la pierre, et il en résultait certaines vibrations sonores que l'on pouvait, l'imagination

Il est d'expérience vulgaire que l'énergie calorifique se transforme fréquemment en énergie lumineuse. Si l'on échauffe progressivement un corps, ce corps, au-delà d'une certaine température, devient lumineux. Il en est ainsi du fer à partir de 377°, du platine à partir de 390°, etc. La couleur des radiations dépend de la température.

Le passage de l'énergie lumineuse à l'énergie calorifique, inverse du précédent, exige une transformation intermédiaire, qui peut être celle de l'énergie lumineuse en énergie mécanique.

Il est facile de voir les transformations entre elles de l'énergie chimique et de l'énergie calorifique. Ce sont les combinaisons des corps, surtout les combinaisons avec l'oxygène auxquelles est spécialement réservé le nom de combustions. La chaleur animale rentre dans ce dernier groupe.

On observe fréquemment la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique. La lumière semble borner son effet à une sorte d'action de présence, et fournir seulement le travail préliminaire indispensable pour amener certains corps à l'état moléculaire dans lequel ils se combinent ou se décomposent. On peut citer comme exemple la combinaison du chlore et de l'hydrogène à la lumière solaire. Un grand nombre de matières organiques s'oxydent en présence de la lumière : toute la photographie est basée sur cette propriété. On sait que la lumière est indispensable à la décomposition de l'acide carbonique par les parties vertes des végétaux. Dans tous ces cas, l'énergie chimique produite se mesure par la quantité de chaleur dégagée ou absorbée par la réaction.

Inversement, l'énergie chimique peut se transformer en énergie lumineuse quand la quantité de chaleur produite est assez grande pour amener les corps à l'incandescence. C'est ce qui a lieu notamment dans les flammes dont nous nous servons pour nous éclairer.

aidant, prendre pour des paroles et même pour des oracles.
Un prince, meilleur païen que physicien, fit réparer la statue miraculeuse — et mit fin au miracle. L'air n'étant plus alternativement comprimé et dilaté dans les interstices des pierres, ne vibra pas, et Memnon devint muet.

En résumé, on peut passer directement de l'énergie mécanique à l'énergie calorifique ou lumineuse, et inversement. Les actions chimiques peuvent être provoquées par l'une quelconque des formes mécanique, calorifique ou lumineuse de l'énergie, mais sans transformation proprement dite de l'énergie en énergie chimique, l'énergie primitive ne produisant que le travail préliminaire indispensable pour amener les corps dans l'état convenable à la réaction chimique. Inversement, l'énergie chimique est susceptible de se transformer en énergie calorifique ou lumineuse ; elle n'engendre l'énergie mécanique qu'indirectement, c'est-à-dire en passant par l'intermédiaire de l'énergie calorifique ou lumineuse.

Il est infiniment vraisemblable que tout mouvement dérive d'un mouvement antérieur. Le travail mécanique, c'est-à-dire le mouvement sensible à nos sens, pouvant être produit par la chaleur ou par la lumière, nous avons là une confirmation précieuse de la théorie qui attribue la chaleur comme la lumière à des mouvements réels, quoique invisibles à nos yeux.

On est donc amené à voir dans tout agent extérieur à l'homme, dans toutes les forces naturelles, comme on disait autrefois, autant de manifestations spéciales d'un fonds commun d'énergie qu'on suppose constant dans l'univers. Toutes les modalités de l'énergie elle-même se ramènent à une seule, *l'énergie mécanique*, à la condition de comprendre sous ce

nom tous les genres possibles de mouvements qu'ils soient ou ne soient pas appréciables, en tant que mouvements, par nos sens. C'est ainsi qu'on y comprend la chaleur, la lumière et l'électricité, mouvements vibratoires des molécules d'un milieu spécial, l'éther, molécules susceptibles de communiquer leur vibration aux molécules des corps matériels, et susceptibles aussi de recevoir de ces corps communication de leurs vibrations propres.

La plupart des corps lumineux qui nous entourent ne font que réfléchir ou diffuser mécaniquement les rayons venant d'une source en dehors d'eux. La lumière elle-même naît fréquemment aux dépens d'autres formes de l'énergie. Elle s'engendre ainsi par la combustion, en absorbant l'énergie potentielle des affinités chimiques ; — par incandescence, en absorbant soit l'énergie calorifique, soit un travail mécanique ou électrique ; — par phosphorescence, grâce à une absorption préalable d'énergie lumineuse ou de chaleur rayonnante, etc.

En transportant ces considérations dans l'analyse spectrale, on voit qu'un spectre peut être regardé comme ayant pour caractère intrinsèque *la répartition de l'énergie selon la longueur d'onde des diverses radiations* qui composent le spectre. — Voici, d'après M. Lengley, la distribution relative de l'énergie dans le spectre solaire observé par un ciel pur à l'observatoire d'Allegheny.

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Long. d'onde | 0µ35 | 0µ4 | 0µ5 | 0µ6 | 0µ7 | Long. d'onde | 0µ8 | 0µ9 | 1µ0 | 1µ1 | 1µ2 |
| Énergie . . . | 145 | 302 | 837 | 975 | 844 | Énergie . . . | 581 | 390 | 293 | 274 | 260 |

On peut figurer par la courbe ci-contre ces divers résultats (fig. 36), les abscisses représentant les longueurs d'onde, les ordonnées, les énergies (1).

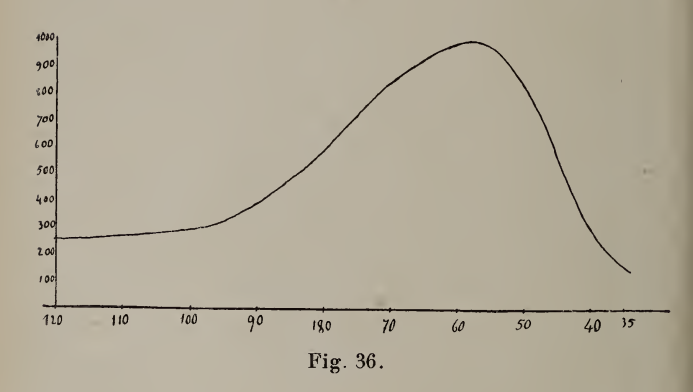



Fig. 36.

Tous les phénomènes observables peuvent être expliqués par ces idées, en tenant compte des pouvoirs absorbants des corps pour les diverses radia-

(1) Lorsque deux quantités éprouvent l'une et l'autre des variations correspondantes, si l'on prend à divers moments, aussi rapprochés que possible, sur une droite horizontale XX' et à partir d'un point fixe X, des longueurs représentant les points ainsi obtenus des perpendiculaires de longueurs proportionnelles aux variations de la seconde quantité, si l'on joint enfin les sommets de ces perpendiculaires par une ligne continue, on obtient une certaine courbe qui figure à elle seule d'une façon sensible les variations totales du système. Les lignes horizontales portent le nom d'abscisses et les perpendiculaires celui d'ordonnées.

tions (Ch. VI, *infra*) et de la sensibilité de nos réactifs ordinaires. Cependant, bien que toute récente, cette science des radiations apparaît incomplète devant les découvertes des électriciens modernes. Les théories de Maxwel, les magnifiques expériences de Hertz ont montré qu'il existait une onde électrique analogue à l'onde lumineuse et pouvant interférer comme elle ; le spectre pourrait être prolongé dans l'infra-rouge où les radiations calorifiques seraient bientôt rejointes par les radiations électriques. Ces dernières viendront-elles simplement se ranger à côté de leurs sœurs plus petites, ou bien emporteront-elles avec elles-mêmes toute l'optique, toute la chaleur, toute la chimie et toute la physique, à vrai dire, dans la science universelle de l'éther ; l'électricité ? L'avenir nous dira que penser d'une pareille généralisation.

Quant à présent, il semble plausible d'admettre que l'énergie, susceptible de nous apparaître sous une infinité d'aspects, procède au fond d'une puissance unique : l'énergie dynamique, dont le son, la chaleur, la lumière, l'électricité, etc., ne sont que des manifestations diverses dans des périodes vibratoires plus ou moins rapides La vibration, essence de l'énergie, une fois apparue, sa vitesse s'accroît progressivement jusqu'à des valeurs énormes, en produisant, pour chaque vitesse déterminée, une manifestation caractéristique susceptible d'impres-

sionner, soit nos sens, soit des réactifs appropriés.

Depuis l'instant où nous commençons à la concevoir jusqu'à celui où elle affecte le sens de l'ouïe, l'énergie nous apparaît sous la forme mécanique, forme vibratoire d'une extrême lenteur sous laquelle nous l'utilisons dans l'industrie. A partir de 16 vibrations par seconde, le sens de l'ouïe est impressionné, et transmet au cerveau l'impression de *son*. La limite des sons aigus perceptibles atteint 48,000 vibrations par seconde. La chaleur se manifeste alors, précédée de l'énergie vibratoire infra-calorifique qui lui sert, en quelque sorte, d'intermédiaire; il y a chaleur à partir de $10 \times 10^9$ vibrations par seconde. A partir de $370 \times 10^9$ vibrations par seconde, l'œil perçoit la première onde lumineuse (rouge foncé); puis naissent successivement toutes les couleurs du spectre avec les vitesses indiquées au chapitre précédent. On peut comparer dans une certaine mesure ce spectre à une gamme ascendante où le rouge correspondrait par exemple à l'ut fondamental. Si la gamme est complète, on doit trouver à son extrémité une radiation lumineuse correspondant à un nombre de vibrations double de celui du rouge, du *rouge à l'octave aiguë*, pour ainsi dire, correspondant à $400 \times 10^9$ vibrations par seconde. C'est précisément le chiffre donné par la teinte lavande observée à l'ultra-violet. Il n'est pas possible à l'œil de prolonger plus loin son investi-

gation ; les vibrations lumineuses trop rapides lui échappent, de même que les vibrations sonores de plus de 48.000 par seconde échappent à l'oreille. Mais nous avons dit qu'une substance fluorescente permettait de rendre visibles ces vibrations en en abaissant la vitesse ; elles sont, de plus, capables de provoquer des réactions chimiques.

Enfin, dans cette théorie, on doit, au-delà de l'ultra-violet, rencontrer l'énergie vibratoire électrique ; on n'est pas parvenu jusqu'ici à préciser complètement cette sorte de vibrations.

Au-delà de l'énergie électrique, serait, correspondant à des longueurs d'onde très petites, l'énergie nerveuse, c'est-à-dire l'influx nerveux.

En fait, ces diverses manifestations de l'énergie ne se rencontrent guère isolément dans la nature. Une cloche qui rend un son, par exemple, traduit par cela même à nos sens une certaine énergie sonore ; mais, en même temps, cette cloche est animée d'un mouvement oscillatoire (énergie mécanique) ; elle a une certaine température (énergie calorifique) ; une certaine couleur (énergie lumineuse) ; un certain potentiel électrique (énergie électrique), etc.

C'est seulement en raison de notre impuissance à les étudier simultanément que nous examinons l'une après l'autre ces manifestations diverses de l'énergie.

## VII

## Propriétés des radiations. Pouvoirs émissifs, réflecteurs, absorbants.

### Émission. — Absorption. — Diffusion,

Nous avons dit que, selon le réactif exposé aux radiations du spectre d'une source, ces radiations donnaient lieu à des actions calorifiques, lumineuses ou chimiques. L'énergie vibratoire totale de la partie de spectre considérée, n'est pas employée entièrement à échauffer un corps qu'on lui présente, à impressionner une rétine ou à déterminer une réaction chimique. C'est même le caractère complexe de cette action qui fait que, pour la mieux connaître, on est amené à étudier séparément l'énergie calorifique, lumineuse et chimique, de chaque région du spectre. Les définitions de ces énergies dépendent des corps ou appareils employés comme réactifs.

C'est ainsi qu'on désignera l'unité de quantité de chaleur, sous le nom de calorie ; la calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° la température de l'unité de masse d'eau, c'est-à-dire d'un gramme d'eau, les températures étant comptées en degrés centigrades ; le corps employé comme réactif est ici le thermomètre.

L'unité de quantité de lumière est la quantité

de lumière qui tombe sur l'unité de surface (centimètre carré) d'un écran placé à l'unité de distance (centimètre) de la source lumineuse choisie pour unité d'intensité, de façon à recevoir normalement les rayons lumineux. Nous verrons que l'intensité d'une source lumineuse dépend de la quantité appelée *éclairement*, laquelle est appréciée par le réactif le plus employé de la lumière, l'œil.

L'unité d'énergie chimique, que M. Abel Buguet propose d'appeler énergie graphique, par allusion à l'impression graphique déterminée par l'action de cette énergie sur une plaque photographique, est l'énergie graphique tombant sur l'unité de surface d'un écran placé à l'unité de distance d'une source dont l'intensité graphique est un.

Tandis qu'il est facile de mesurer rationnellement et en valeur absolue, l'énergie calorifique contenue dans une portion du spectre, on ne peut donner qu'une mesure relative de l'énergie lumineuse et de l'énergie chimique. On a pu démontrer, néanmoins, que, dans une radiation d'une longueur d'onde déterminée, les trois propriétés lumineuses, chimiques et calorifiques suivent les mêmes lois, lois qu'on a étudiées exactement pour l'énergie calorifique et que nous allons rapidement passer en revue.

Nous exposerons successivement dans quelles circonstances les radiations prennent naissance, c'est-à-dire leur émission ; quelles modifications

elles subissent en se propageant à travers les corps matériels ; quels effets enfin, présentent, soit les corps qui émettent des radiations, soit ceux qui les absorbent et les arrêtent. Nous avons déjà vu le mode de propagation des radiations dans un milieu homogène et les changements de direction qu'elles éprouvent à la surface de séparation de deux milieux ; ce que nous allons dire complètera notre étude générale des modifications qu'elles subissent.

*Émission.* — Un corps émet des radiations lorsque les molécules matérielles qui le composent sont animées d'un mouvement vibratoire qu'elles transmettent aux molécules de l'éther ; cette communication s'opère très vraisemblablement sans choc, grâce à une déformation du milieu élastique éther transmise de proche en proche par un mécanisme dont les détails nous sont inconnus.

La manière la plus simple de provoquer ces vibrations moléculaires dans un corps est d'élever sa température. Si l'on conduit l'opération de manière que le corps s'échauffe peu à peu, l'action calorifique se montre seule au début ; ce n'est qu'à partir d'une certaine température que le corps deviendra lumineux. A partir de cette température, il reste chaud et lumineux, mais sa couleur change. Enfin, au-delà d'une température déterminée, plus élevée que la précédente, il émet des radiations

chimiques capables de noircir un papier imprégné de chlorure d'argent.

Il est facile de faire l'expérience en faisant rougir un fil de platine au moyen d'un courant électrique, d'intensité variable. Si l'on met ce fil devant la fente d'un spectroscope, disposé de manière à donner sur un écran une image réelle, on ne voit tout d'abord rien ; mais on peut constater, à l'aide d'une pince thermo-électrique, la présence d'un spectre infra-rouge. La température s'élevant, on voit, quand elle atteint une certaine valeur, une ligne lumineuse rouge qui vient se dessiner sur l'écran, de manière à faire immédiatement suite au spectre infra-rouge. Si l'on augmente encore l'intensité du courant électrique, cette ligne rouge s'étend dans une seule direction en devenant une bande dont l'extrémité variable prend successivement les diverses teintes du spectre jusqu'à la teinte lavande de l'ultra-violet ; au-delà on peut constater la présence du spectre ultra-violet par les moyens habituels. La composition du faisceau de radiations émis par un corps varie donc bien avec la température ; elle varie aussi avec la nature du corps.

Un solide ou un liquide, amené à l'incandescence, émet toutes les radiations et donne un spectre d'émission continu ; au contraire, un gaz incandescent, formant une flamme d'épaisseur ordinaire, donne un spectre formé de raies lumineuses sur un fond

obscur : le spectre d'une telle flamme est donc d'apparence discontinue (1).

Si la flamme a une grande épaisseur, les raies brillantes s'élargissent et le spectre devient continu comme celui d'un solide.

*Absorption.* — L'énergie émise par un corps de petites dimensions se transmet dans le vide ou plus exactement dans l'air, pour lequel seul la loi a été démontrée, d'après la loi suivante :

*L'énergie des radiations reçues par un corps varie en raison inverse du carré de la distance de ce corps au corps qui émet les radiations.*

Mais les radiations peuvent aussi se transmettre à travers les corps dits transparents. Leur énergie va alors en décroissant avec les épaisseurs suivant une loi qui se formule ainsi : *les épaisseurs croissant en progression arithmétique, les énergies décroissent en progression géométrique.*

Une partie de l'énergie des radiations tombant sur un corps est donc absorbée en traversant ce corps ; on nomme *pouvoir absorbant* du corps le rapport de l'énergie absorbée par le corps à l'énergie incidente.

(1) Les raies du spectre ayant une position invariable pour chaque corps déterminé, on a pu, de leur présence dans une flamme quelconque, conclure à la présence à l'état gazeux dans cette flamme du corps correspondant. L'étude du spectre solaire a permis ainsi de déduire de la présence constante de certaines raies la constitution chimique probable du soleil.

Si toute l'énergie incidente est absorbée, c'est-à-dire si le pouvoir absorbant est égal à l'unité, le corps est opaque. Le pouvoir absorbant croissant avec l'épaisseur, tout corps transparent pris en épaisseur suffisante devient opaque. Il en est ainsi de l'eau sous une épaisseur de 100 mètres. Cette absorption de l'énergie provient de ce qu'une partie du mouvement des molécules d'éther se communique aux molécules matérielles qui subissent de ce fait des modifications.

On a démontré que l'absorption diminuait dans le même rapport les trois propriétés lumineuse, calorifique et chimique des radiations. Mais les radiations de diverses longueurs d'onde ne sont pas également absorbées par tous les corps.

On étudie ces phénomènes en plaçant ce corps à examiner entre une source lumineuse et la pente d'un spectroscope. On obtient ainsi ce qu'on appelle le spectre d'absorption du corps considéré.

Il y a entre l'absorption et l'émission une relation simple :

*Si l'on fait traverser par un faisceau de radiations complètes un corps capable d'émettre des radiations, ce corps absorbe spécialement les radiations qu'il a la propriété d'émettre.*

*Réflexion. — Pouvoir réflecteur. — Diffusion. — Pouvoir diffusif.* — Nous avons vu que des radiations tombant sur la surface d'un corps sont réfléchies régulièrement si cette surface est convenablement

polie, irrégulièrement ou diffusées si le corps n'est pas poli.

Toute l'énergie incidente n'est pas réfléchie, dans bien des corps polis ; le rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente constitue le *pouvoir réflecteur* qui varie avec la nature de la surface réfléchissante avec la nature des radiations, et avec la valeur de l'angle d'incidence.

Si l'on recouvre un corps non réfléchissant de couches successives d'un corps réfléchissant, on s'aperçoit que le pouvoir réflecteur augmente avec l'épaisseur de la couche.

Dans le cas des corps non polis, on appelle *pouvoir diffusif total* d'une substance le rapport de la somme des énergies diffusées par cette substance dans toutes les directions, à l'énergie incidente.

La diffusion pour chaque corps varie beaucoup avec la nature des radiations incidentes. Quant à la nature des radiations diffusées, on a recours pour l'étudier à des méthodes différentes suivant que le corps examiné est un corps transparent ou opaque. Pour ces derniers, on peut employer deux procédés : 1° On dispose verticalement contre un écran parfaitement noir, sur le prolongement l'une de l'autre, deux bandes étroites, l'une de papier blanc, l'autre recouverte de la substance à étudier, et on les regarde à travers un prisme dont l'arête est disposée aussi verticalement. On voit ainsi deux

spectres : l'un, celui du papier, contenant toutes les couleurs dans les proportions réalisant le blanc ; l'autre, juxtaposé, où manquent les couleurs absorbées, les couleurs diffusées restant seules ; 2° après avoir formé sur un écran parfaitement noir un spectre réel pur horizontal, on dispose à sa partie supérieure une feuille de papier blanc, et, à sa partie inférieure, la substance à examiner.

L'étude des spectres de diffusion a montré à Newton que chaque couleur spectrale conserve sa nature, c'est-à-dire ne change pas de longueur d'onde ; l'effet d'une surface opaque se borne à diffuser les rayons dans des proportions variant avec leur longueur d'onde et qu'on pourrait mesurer.

## VIII

### La couleur des corps dans ses rapports avec des phénomènes d'absorption.

La couleur d'un corps dépend de sa nature et de l'éclairage. Couleurs des corps transparents et des corps opaques.

Nous avons montré, précédemment, que les couleurs de quelques corps étaient dues à l'interférence ou à la polarisation de la lumière ; ce sont là des cas exceptionnels ; de l'absorption, dépendent presque entièrement les couleurs des objets ordi-

naires. Un corps n'engendre pas de couleurs lui-même ; et sa coloration résulte de l'exercice d'une sorte de faculté élective qu'il possède (1). Examinons d'abord ce qu'est la couleur d'un corps transparent. Nous avons dit que la nature des radiations absorbées par un corps varient avec celui-ci, ainsi que leur loi d'absorption. Si une lame d'un corps transparent absorbe également les diverses radiations composant la lumière blanche, c'est-à-dire, si le coefficient d'absorption est le même pour ces diverses radiations, un faisceau de lumière qui la traverse est affaibli d'intensité, mais non modifié dans sa couleur. Un tel corps est dit *incolore ;* le spectre d'absorption est absolument semblable au spectre ordinaire, et les corps que l'on regarde à travers sont vus avec leurs couleurs propres. Le verre en lames minces, l'eau et l'air *sous de faibles épaisseurs* sont des corps transparents incolores. Ils cessent d'être incolores si l'épaisseur augmente. Ainsi, du verre en lame épaissie, paraît vert, parce qu'il absorbe le rouge. L'eau, sous de grandes épaisseurs, est bleue ou violette.

La plupart du temps, un corps transparent est opaque pour certaines radiations déterminées. Si donc un faisceau contenant ces radiations le traverse, il sera modifié par son passage à travers le

(1) Voir : *O. N. Rood.*—Théorie scientifique des couleurs. Bibliothèque scientifique internationale. — Paris, Alcan.

corps et ne présentera pas la même couleur à l'émergence qu'à l'incidence. S'il s'agit, en particulier, d'un faisceau de lumière blanche, la lumière transmise est colorée, et, en général, la lumière réfléchie ou diffusée par la substance présente la même teinte : *La couleur d'un corps transparent est celle de la lumière qu'il laisse passer*. Cette couleur dépend bien de l'absorption. Si, en effet, on regarde à la lumière du jour un verre coloré, posé à plat sur un morceau de drap noir, il paraît blanc comme le paraîtrait un morceau de verre ordinaire mis à sa place ; c'est que les radiations qui arrivent à l'œil ont été uniquement réfléchies par la surface supérieure du verre, celles qui ont pénétré à l'intérieur ayant été absorbées par le drap noir. Si nous le soulevons légèrement, de manière à permettre à la lumière du jour de le traverser, la lumière transmise prend la couleur du verre.

Si nous regardons à travers un tel verre coloré des objets, leur couleur sera modifiée ou non, selon qu'elle comprendra ou non des radiations absorbées, arrêtées par ce verre.

C'est ainsi qu'un verre rouge ne laisse passer que des radiations rouges, un verre vert que des radiations vertes, etc., comme on peut s'en assurer en comparant leurs spectres d'absorption avec le spectre normal. Il suffit de couvrir la moitié de la fente d'un spectroscope avec le verre à étudier

pour constater que le spectre d'absorption d'un verre rouge, par exemple, se compose seulement d'une bande rouge (figure 37, 2), les autres radiations étant absorbées par ce verre. Si nous considérons un corps transparent absorbant au contraire les radiations rouges et laissant passer les autres, telle qu'une cuve transparente d'épaisseur convenable remplie d'eau céleste qui est bleue (couleur complémentaire du rouge) on ne verra que la partie DH du spectre, c'est-à-dire une bande présentant le jaune, le vert, le bleu et le violet.

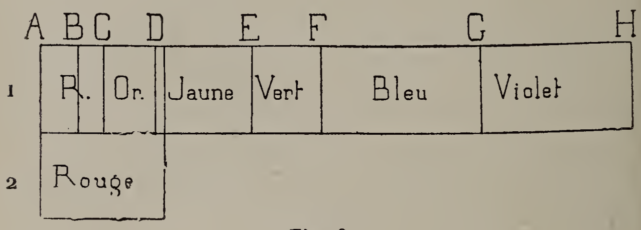



Fig. 37.

On conçoit dès lors que la superposition du verre rouge et du liquide bleu soit complètement opaque à la lumière blanche.

Si, par exemple, nous faisons tomber la lumière d'une lampe sur une cuve pleine d'eau céleste munie d'une lentille, nous aurons, sur un écran une image bleue d'une fente placée devant la lampe ; en descendant alors progressivement le long de la cuve une lame de verre rouge, l'image de la fente apparaît

bleue en haut, rouge en bas, les deux parties bleues et rouges étant resserrées sur un espace noir qui finit par occuper toute l'image de la fente quand le verre rouge recouvre toute la cuve (fig. 38).

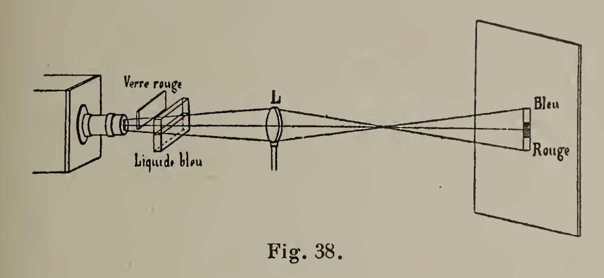



Fig. 38.

Nous avons vu que le pouvoir absorbant variait avec l'épaisseur du corps ; la couleur varie donc aussi avec cette épaisseur : à travers une seule plaque de verre jaune, la lumière blanche paraît jaune ; si on en superpose deux, la couleur change sensiblement ; si on en superpose sept ou huit, la lumière transmise devient orangée ; avec un plus grand nombre, elle devient rouge foncé. Une couche mince d'une solution de chlorure de chrome transmet de la lumière verte, une couche convenablement épaisse transmet de la lumière colorée où le rouge domine.

La couleur des corps opaques, comme celle des corps transparents, est due à l'absorption. On sait que, pour chaque corps, la différence varie avec la nature des radiations. Si un corps diffuse à peu près également toutes les radiations, il renvoie à

l'œil d'un observateur de la lumière de composition sensiblement la même que celle de la lumière incidente, dont la couleur n'a par suite point varié par la diffusion. La couleur d'un tel corps est la même que celle de la source qui l'éclaire : il paraît rouge dans la lumière rouge, bleu dans la lumière bleue, enfin blanc dans la lumière blanche.

Un corps ne diffusant aucune radiation ne serait pas vu ; il serait noir et ne nous avertirait de sa présence qu'en masquant une partie d'un autre corps éclairé placé derrière lui. En réalité, il n'y a pour ainsi dire pas de tels corps ; les corps noirs sont seulement des corps de diffusion très faible, presque nulle. Un tel corps éteint la lumière qui le frappe quelle que soit la couleur de celle-ci. Si on produit par exemple un spectre sur un écran, un ruban noir promené dans le spectre paraît noir dans toutes ses régions.

Si un corps ne diffuse qu'une seule radiation, il donne à un observateur la même sensation, — celle de la couleur qu'il diffuse, — qu'on l'éclaire avec de la lumière simple de la couleur qu'il diffuse ou avec une lumière composée contenant la radiation qu'il peut diffuser. Si, au contraire, on l'éclaire avec de la lumière simple différente de cette radiation, ou avec de la lumière composée ne la contenant pas, ce corps ne diffuse rien et paraît noir.

C'est ainsi qu'un ruban vert, promené le long d'un

spectre sur un écran, brille d'un vif éclat vert dans la portion verte du spectre et semble noir dans les autres régions, dans le rouge par exemple.

Inversement, un ruban rouge brille d'un rouge vif dans la région du rouge et paraît obscur dans la région du vert.

Si un corps peut diffuser plusieurs radiations différentes, il présentera des couleurs différentes selon qu'on l'éclairera avec de la lumière contenant toutes ces radiations (avec de la lumière blanche par exemple) ou avec de la lumière n'en contenant qu'une, deux ou plusieurs. Si on l'éclaire avec de la lumière n'en contenant aucune, il paraîtra noir.

En résumé les couleurs des objets dépendent de conditions très complexes; aussi n'est-on pas étonné de voir les difficultés qu'éprouvent les peintres à les reproduire exactement, difficultés très grandes, pour ne pas dire insurmontables, pour quelques-unes d'entre elles, telles que les couleurs métalliques, les couleurs des flammes, etc. Comme nous le montrerons bientôt, seule la photographie est capable de reproduire exactement, à l'aide de procédés qui seront exposés, toutes les colorations quelles qu'elles soient.

---

# TROISIÈME PARTIE

---

## L'œil
## et l'appareil photographique.
## Vision et photographie.

TROISIÈME PARTIE

# Vision et Photographie.

## I

### L'œil et la vision

La vue est le sens qui, grâce à un organe spécial, l'œil, nous fait percevoir la lumière. Nous avons dit qu'un rayon, ou même un faisceau lumineux, n'est autre chose qu'une certaine quantité d'énergie qui voyage, se transporte dans un volume donné. Un écran interceptant un tel faisceau reçoit une quantité d'énergie proportionnelle au temps d'exposition et aussi à sa surface (1). Quoiqu'il en soit, on peut concevoir que cet écran agisse comme une machine capable de transformer l'énergie incidente en influx nerveux, lequel, arrivant au cerveau, se traduirait par une impression lumineuse. On aura ainsi une idée exacte de la transformation opérée

(1) En le supposant assez éloigné de la source commune pour que tous les rayons tombent sensiblement sous le même angle.

par les cellules sensibles d'un écran particulier, la rétine, qui, chez certains animaux (tache oculaire des cœlentérés, des mollusques) suffit à lui seul pour constituer l'organe de la vision (1). C'est dans la partie du cerveau appelée *lobes optiques* que se produit la sensation, qui, comme nous l'avons dit, est subjective, mais répond à un phénomène objectif, à la mise en œuvre d'une énergie que l'intelligence peut, par abstraction, concevoir en dehors de ses manifestations sensorielles diverses.

La vue, au reste, ne rend compte que de certaines manifestations de cette énergie : elle ne saisit que quelques radiations particulières, l'œil n'ayant qu'un pouvoir restreint, comme tous les organes des sens, au fond simples transformateurs de l'énergie qui seule existe objectivement.

(1) Tous les animaux n'ont pas d'yeux, c'est-à-dire d'appareil nettement différencié sur lequel la lumière agisse d'une manière exclusive ou prépondérante, et cependant tous paraissent excitables par la lumière : les hydres, les vers de terre, les chélopodes aveugles s'aperçoivent très nettement qu'une partie quelconque de leur corps est frappée par la lumière, et réagissent les uns pour éviter, les autres pour rechercher cette excitation. L'excitabilité viendrait alors sur toute la surface cutanée.

Au reste, un appareil visuel spécial se rencontre même chez des êtres d'une organisation rudimentaire. C'est ainsi que des êtres unicellulaires possèdent un œil complexe avec un corps réfringent (cristallin). Le plus souvent, chez ces organismes inférieurs, une simple tache noire correspond à la rétine.

*Structure de l'œil.* — L'œil est une sorte de globe, relié au cerveau par un nerf appelé nerf optique. Les deux nerfs optiques, correspondants respectivement à chacun des deux globes oculaires, avant d'arriver au cerveau, s'entre-croisent en échangeant une partie de leurs fibres, formant ainsi le chiasma. Il existe en outre des parties accessoires : sourcils, paupières, cils, glandes et appareil lacrymal, muscles moteurs, que nous ne décrirons pas.

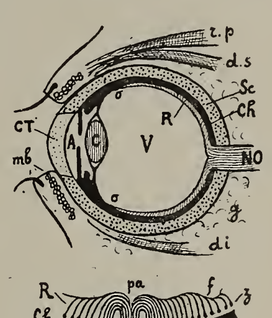


Fig. 39.

Le globe de l'œil peut, comme nous le verrons plus loin (fig. 39), être assimilé à la chambre noire de Porta ; la plaque sensible est formée par la rétine, tapissant le fond solide de la chambre que constitue la sclérotique ou cornée opaque. Entre la rétine et la sclérotique est interposée une membrane noire, la choroïde, qui joue le rôle du noir de fumée dans les appareils [d'optique et empêche, grâce à son pouvoir absorbant, les réflexions intérieures de la lumière. A cette chambre est annexé un système optique convergent, un objectif comme nous l'appellerons dans un chapitre postérieur, c'est-à-dire un assemblage de lentilles, capable de donner sur l'écran (ou rétine) une image réelle des objets extérieurs.

Cette image est renversée et plus petite que l'objet, celui-ci étant situé à une distance supérieure au double de la distance focale (Voir chapitre V, 1re partie). Le cristallin (C, fig. 39), véritable lentille biconvexe, situé en avant de la rétine, joue ce rôle. La sclérotique, qui constitue le globe de l'œil, enveloppe le tout, mais devient transparente (cornée transparente) à sa portion antérieure, devant le cristallin.

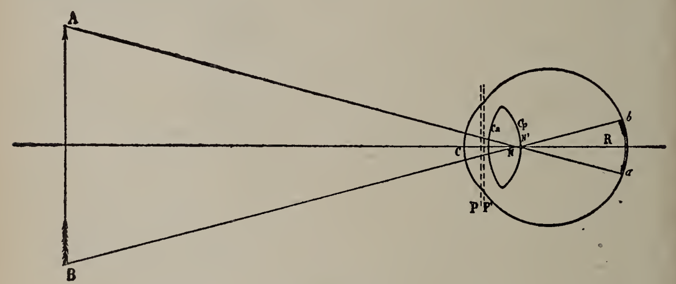



Fig. 40.

Entre la cornée transparente et le cristallin est la chambre antérieure (fig. 39, A), remplie par l'humeur aqueuse ; entre le cristallin et la rétine est la chambre postérieure remplie par l'humeur vitrée (fig. 39, V). C'est en réalité l'ensemble de ces trois milieux réfringents : humeur aqueuse, cristallin et humeur vitrée qui constitue l'appareil dioptique de l'œil. Pour plus de commodité, nous l'assimilerons à une simple lentille biconvexe, et nous considérerons ainsi ce qu'on appelle l'œil réduit. Ce

système est complété par l'iris, sorte de diaphragme, c'est-à-dire d'écran percé en son centre d'une ouverture variable permettant de limiter à volonté la quantité d'énergie qui peut pénétrer dans l'œil.

Nous ajouterons, pour achever la description de l'œil, une description de la rétine. C'est l'épanouissement du nerf optique qui, traversant les deux autres enveloppes, vient tapisser la surface interne de la choroïde en retournant vers l'extérieur les terminaisons de ses fibres ; à celles-ci succède un système de trois assises principales de cellules, celle qui est en contact avec la terminaison nerveuse étant la plus interne, la plus externe étant appuyée contre la choroïde. Cette rangée, la première en venant du dehors, est celle des cônes et des bâtonnets (C et B fig. 41), cellules nerveuses dont le prolongement protoplasmique est modifié en forme de cône ou de bâtonnet ; elles sont le point de départ de l'impression lumineuse qui, après avoir traversé le corps de la cellule, passe dans le *plexus externe* x formé par les terminaisons protoplasmiques des cellules de la deuxième assise ou cellules bipolaires d, f.

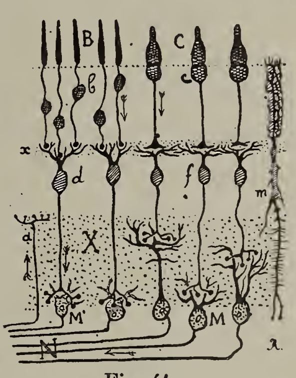


Fig. 41.

De là, l'excitation sensorielle est conduite dans le plexus interne X, couche moléculaire où les cellules multipolaires de la troisième rangée la reprennent par leurs prolongements protoplasmiques, richement arborisés, pour les transmettre à leurs prolongements fibrillaires qui se continuent directement par les fibres du nerf optique N, dernier intermédiaire entre l'ébranlement perçu et les lobes optiques du cerveau.

L'ensemble de la rétine forme une membrane mince,

molle et transparente ; à l'endroit où entre le nerf optique est la papille optique, au fond d'une tache blanchâtre de laquelle divergent les vaisseaux nourriciers (artères et veines) de la rétine. Cette région appelée parfois *punctum cœcum* est insensible à l'action de la lumière ; au pôle postérieur de l'œil est la tache jaune, région du maximum de sensibilité à la lumière. Outre quelques accessoires que nous passerons sous silence, il existe dans la rétine un pigment rouge ou pourpre rétinien, qui semble se détruire à la lumière pour reparaître à l'obscurité ; une solution d'alun rend ce pourpre inaltérable à la lumière.

*Physiologie de la Vision de la forme.* — Les milieux cristallins de l'œil jouent, comme nous l'avons dit, le rôle d'une lentille convergente donnant d'un objet extérieur des images qui se peignent sur la rétine. Nous avons montré que si un objet se déplace devant une lentille convergente (chapitre V, 1re partie) son image se déplace aussi ; elle ne se formerait donc pas sur la rétine, quelle que soit la position des objets sans l'intervention d'un phénomène spécial auquel on a donné le nom de phénomène d'accommodation. On a montré que de puissants muscles appelés procès ciliaires, changeaient la courbure du cristallin lorsque le besoin s'en faisait sentir, faisant ainsi varier la distance focale du système optique de l'œil de

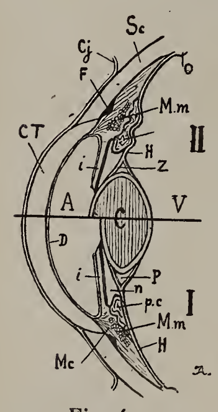


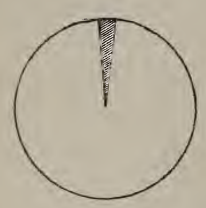
Fig. 42.

manière à ramener toujours sur la rétine l'image d'un objet extérieur. La figure 42 explique le mécanisme de l'accommodation. La partie inférieure de la figure montre le cristallin dans son état normal, qu'il a lorsqu'on regarde un objet éloigné ; la partie supérieure le montre au contraire avec une courbure modifiée pour la vision des objets rapprochés.

L'image formée sur la rétine est renversée ; mais l'éducation de l'œil la fait voir redressée. Cette image a pu être fixée grâce aux propriétés du pourpre rétinien : L'expérience a été faite par M. Kühne : un lapin maintenu à l'obscurité pour exagérer la sensibilité de sa rétine a été exposé pendant un instant la tête tournée vers la fenêtre du laboratoire, puis sacrifié. La rétine mise à nu et immergée quelque temps dans un bain d'alun à $\frac{5}{100}$ présentait une image blanche sur un fond d'un beau rouge, et sur laquelle les carreaux de la fenêtre étaient nettement dessinés.

*Persistance des impressions lumineuses.* — L'impression lumineuse subsiste environ 1/10 de seconde après la suppression de la cause qui l'a provoquée. Il s'ensuit que les images successives d'un objet lumineux animé d'un mouvement suffisamment rapide semblent se fusionner : un charbon en ignition dessinera ainsi un trait de feu. C'est sur cette persistance des impressions qu'est fondée une expérience de Newton destinée à montrer la recomposition de la

lumière blanche. On a divisé un disque (fig. 43) en un certain nombre de secteurs qu'on a coloriés avec toutes les teintes de l'arc-en-ciel. Si on imprime à ce disque un mouvement de rotation autour de son centre, l'œil voit un disque de surface blanche. La théorie de l'effet produit est facile à dégager de ce qui précède.



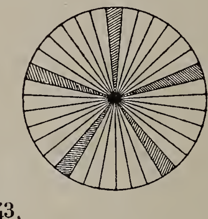


Fig. 43.

Si notre disque n'eût porté qu'un secteur d'une seule couleur, rouge par exemple, pendant la rotation toute la surface nous eût semblé uniformément rouge, en vertu de la persistance de l'impression lumineuse éprouvée; si le secteur avait été jaune, bleu, etc., la surface entière du disque eût paru jaune, bleue, etc. Si donc tous les secteurs sont colorés et présentent les couleurs de l'arc-en-ciel, la surface du disque va présenter toutes ces colorations à la fois en chacun de ces points ; elle paraîtra blanche, comme le montre en effet l'expérience.

*Vision binoculaire. — Stéréoscope.* — Pourquoi, chaque œil donnant une image sur la rétine correspondante, ne voit-on qu'une seule image et non deux ? C'est que chaque point lumineux se peint normalement sur les deux rétines en deux points correspondants, et que les excitations se transmettent en deux points correspondants du cerveau :

une telle excitation double ne produit alors qu'une sensation unique. Il suffit de déplacer au moyen d'une très légère pression du doigt un des globes de l'œil pour faire cesser la correspondance et voir deux images d'un même objet ; bien plus, ces images ne sont pas tout à fait identiques, les points de vue n'étant pas les mêmes pour les deux yeux. L'œil droit D (fig. 44) voit un peu plus de la partie droite BB' de l'objet, l'œil gauche un peu plus de la partie gauche AA'. C'est pourquoi la vision binoculaire donne la sensation du relief, c'est-à-dire des trois dimensions des objets, sensation qu'il ne faut pas confondre avec l'appréciation de la distance qui a lieu avec un seul œil, comme on peut s'en convaincre, et résulte d'une sorte d'éducation inconsciente de l'œil. On juge de la distance des objets, d'abord par l'effort de

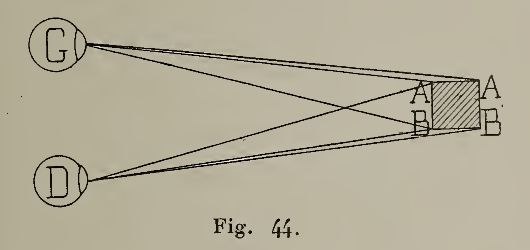



Fig. 44.

l'accommodation nécessaire pour les voir, mais surtout par la forme et la dimension de l'image rétinienne quand nous connaissons leurs dimensions réelles. En reproduisant ces objets en *perspective* le dessinateur ou le peintre nous donne sur un tableau non seulement l'illusion des objets eux-mêmes, mais encore celle de leur éloignement ou de leur proximité relative.

On démontre que la sensation du relief provient de la superposition cérébrale de deux images un peu différentes, en reproduisant cette sensation par la superposition de deux dessins ou photographies représentant le même objet, mais pris de deux points de vue un peu différents. Le stéréoscope, dû à Wheastone, est un des appareils combinés pour produire cette illusion.

Le stéréoscope se compose de deux portions de lentilles convergentes L, $L_1$ (fig. 45) de mêmes distances focales, placées devant chacun des yeux. La portion conservée de chaque lentille forme une sorte de prisme à surface convexe, dont on a eu soin de tourner les arêtes l'une vers l'autre. Chaque œil regarde à travers la lentille correspondante une

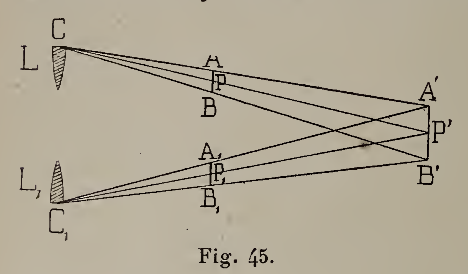



Fig. 45.

des deux images stéréoscopiques placées côte à côte. On a soin de placer devant l'œil droit l'image qui reproduit la plus grande partie de la droite de l'objet, devant l'œil gauche celle qui reproduit la plus grande partie de la gauche. Les dimensions de l'appareil sont calculées de telle sorte que les axes secondaires CP, C'P' de deux points correspondants des deux dessins se rencontrent précisément à la distance où se forment les images, en P'. Les rayons venant dans les deux yeux se comportent comme s'ils venaient d'un seul objet virtuel A' B' qui donne dans chacun d'eux une image différente, d'où la sensation de relief. Si on intervertissait la place des deux dessins on verrait l'objet non plus en relief, mais en creux (pseudoscopie). Si les deux dessins sont colorés différemment, les couleurs se composent ; s'ils sont colorés de *couleurs complémentaires*, l'objet en relief paraît blanc.

## II

### Vision des couleurs. — Couleurs complémentaires. Composition des couleurs.

L'impression produite par les colorations très variées que l'on rencontre dans la nature — colorations dues en général aux phénomènes d'interférence, qu'elles se produisent dans les lames minces ou par polarisation de la lumière — n'est qu'un effet physiologique, variable d'un observateur à l'autre, et dont on ne peut rendre compte que pour une vue moyenne.

De même que l'oreille n'est pas capable de percevoir toutes les vibrations des corps sonores, de même l'œil n'est point sensible à toutes les vibrations lumineuses. Si l'on représente par 266 la longueur d'onde des premiers rayons susceptibles d'exciter la rétine (rayons correspondant aux sons les plus bas), la longueur d'onde des derniers rayons visibles est représentée par 167. Or, ces longueurs d'onde sont en raison inverse des nombres de vibrations par unité de temps.

Mais tandis que, lorsque plusieurs systèmes d'ondes frappent l'oreille, celle-ci distingue les diverses notes, tandis qu'un musicien, par exemple, est capable de discerner dans un accord la note pro-

duite par chaque instrument, lorsque plusieurs systèmes d'ondes rencontrent la rétine, l'œil ne donne qu'une impression unique ; le peintre le plus expérimenté et le plus habile dans son art ne saurait apprécier si une couleur est simple ou de nature complexe.

Deux couleurs dont la teinte et l'éclat paraissent identiques, quelle que soit leur composition réelle, jouent le même rôle quand on les mélange avec d'autres couleurs de nature quelconque ; elles sont équivalentes au point de vue physiologique, comme l'expérience l'a démontré.

Ce mélange des couleurs peut s'opérer : soit en éclairant une surface blanche avec l'ensemble des lumières colorées à combiner, ce qui se fait facilement en remplaçant dans des lanternes à projection les diapositifs ou clichés ordinaires par des verres colorés — soit en superposant les images sur la rétine, — soit encore, grâce à la persistance des impressions lumineuses, en faisant passer successivement les couleurs devant l'œil à intervalles très rapprochés, comme dans l'expérience du disque de Newton.

Deux couleurs sont dites complémentaires quand leur mélange donne la sensation du blanc.

Le tableau suivant (1) contient quelques groupes de couleurs spectrales complémentaires, ainsi que

(1) Extrait de Calmette. — Lumière, couleur et photographie.

la manière de réaliser à peu près par la peinture les teintes correspondantes :

| | |
|---|---|
| Rouge. . . . . . | Rouge garance. |
| Vert bleu. . . . | Oxyde de chrome avec un peu de cobalt. |
| Orangé . . . . . | Jaune de cadmium orangé. |
| Bleu verdâtre. . | Cobalt. |
| Jaune . . . . . . | Chrome pâle. |
| Bleu . . . . . . | Outre-mer de lapis-lazuli. |
| Jaune verdâtre . | Chrome pâle avec un peu d'oxyde de chrome et une trace de cobalt. |
| Indigo . . . . . | Outremer. |
| Vert jaune . . . | Chrome pâle avec un peu de vert émeraude. |
| Violet. . . . . . | Carmin et outre-mer. |
| Vert . . . . . . | Vert émeraude avec un peu de jaune. |
| Pourpre. . . . . | Carmin avec un peu d'outre-mer. |

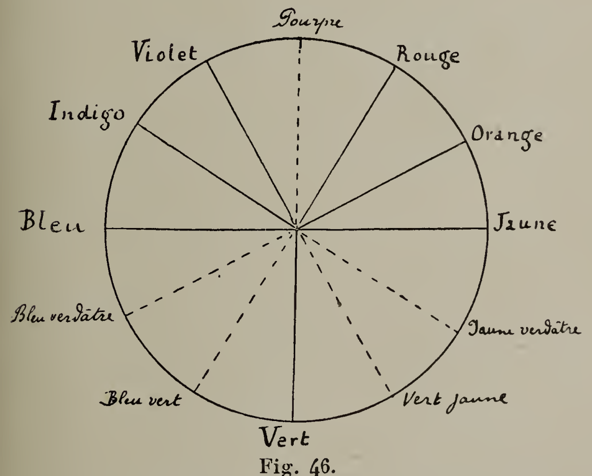



Fig. 46.
Cercle chromatique des couleurs complémentaires

La figure 46, où les couleurs sont disposées dans l'ordre qu'elles occupent sur le spectre, présente les teintes complémentaires rangées deux par deux aux extrémités d'un même diamètre. On voit que la couleur complémentaire du vert n'est pas une couleur simple ; c'est le pourpre, combinaison de rouge et de violet.

Le tableau suivant, dû à Helmholtz, donne une liste précise des couleurs complémentaires :

| COULEURS | Longueur d'onde | COULEURS COMPLÉMENTAIRES | Longueur d'onde | Rapport des longueurs d'onde |
|---|---|---|---|---|
| Rouge . . . . . | 0µ654 | Vert bleu . . . | 0µ490 | 1,334 |
| Orangé . . . . | 0,604 | Bleu verdâtre. | 0,488 | 1,240 |
| Jaune . . . . . | 0,572 | Bleu. . . . . . | 0,480 | 1,190 |
| Jaune verdâtre. | 0,561 | Indigo. . . . . | 0,460 | 1,222 |
| Vert jaune. . . | 0,563 | Violet. . . . . | 0,432 | 1,301 |

Comme on le voit, il n'y a aucune relation entre les longueurs d'onde de deux couleurs complémentaires.

Quand on veut étudier la composition non plus de radiations colorées, de lumières colorées proprement dites, mais de couleurs pigmentaires, c'est-à-dire de couleurs matérielles, solides ou liquides, opposées aux couleurs spectrales, on peut employer soit la méthode du disque de Newton, soit l'appareil de Lambert et Helmholtz. Dans ce dernier cas, on place sur une feuille de papier AB et perpendiculairement à sa surface une lame de verre CD (fig. 47), et on recouvre chacune des moitiés de la feuille de papier ainsi divisée par la lame de verre avec l'une des deux couleurs à compter. L'œil placé en O voit, à la fois, B par transparence, A par réflexion, et éprouve une seule sensation résultant de la combinaison des deux autres.

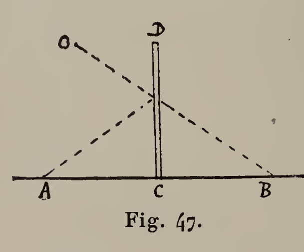


Fig. 47.

Si l'on compare, alors, la composition de deux lumières colorées et de deux couleurs pigmentaires semblables, on voit qu'il y a une grande différence dans les résultats obtenus. Si, par exemple, dans l'appareil de Lambert, on met en A du jaune, en B du bleu, en plaçant convenablement ces deux couleurs, l'œil aura la sensation du vert. Si l'on projette de la lumière jaune et de la lumière bleue sur un écran blanc, la partie où les deux lumières coïncident reste blanche. La contradiction apparente des deux expériences, se lève en observant que les couleurs pigmentaires sont toujours des couleurs complexes; leur mélange détermine, dès lors, toute une série de combinaisons partielles, entre les couleurs simples qui les composent, sans que l'observateur soit à même d'apprécier autre chose que la résultante finale de ces combinaisons.

On peut obtenir la sensation du blanc avec trois, quatre, ou même un nombre quelconque de couleurs spectrales convenablement choisies. De telles couleurs sont dites *complémentaires*.

Tous les peintres savent qu'un petit nombre de matières colorantes suffit pour reproduire toutes les colorations. Étant donné une nuance complète ou simple, on peut toujours la former en mélangeant un certain nombre de couleurs simples. Le nombre minimum de couleurs indispensables est trois. De même, avec trois radiations spectrales choisies parmi celles dont la combinaison peut donner du blanc, on arrive à reproduire sensiblement toutes les couleurs de la palette du peintre avec leurs qualités de ton, d'intensité et de saturation. On peut, en effet, distinguer dans une couleur matérielle ces trois qualités différentes :

1° Le *ton ;* c'est à-dire la couleur spectrale dont elle se rapproche le plus ;

2° L'*intensité ;* c'est-à-dire l'énergie vibratoire des radiations émises ;

3° La *saturation ;* c'est-à-dire le rapport des intensités du ton et de la lumière blanche qui l'accompagne.

Ces qualités correspondent respectivement au ton (ou hauteur) à l'intensité et au timbre du son.

Les trois couleurs choisies par les peintres sont : le rouge, le jaune et le bleu.

Brewster avait conclu de ces faits qu'il n'y a que trois couleurs physiquement distinctes : le rouge, le jaune et le bleu, dont il croyait avoir démontré l'existence unique dans le spectre. La vérité est seulement que trois couleurs convenablement choisies, dites couleurs fondamentales, suffisent en les combinant en proportions convenables à nous donner la sensation de toutes les couleurs simples ou composées. Néanmoins, le principe, fort contestable, des trois couleurs fondamentales, est devenu la base d'une théorie de la sensation des couleurs formulée par Young, et qui, reprise et modifiée par Helmholtz, est encore aujourd'hui admise par beaucoup.

Rappelons tout d'abord la théorie de l'audition des sons de diverses hauteurs. L'oreille la plus parfaite peut distinguer un peu plus de 6000 sons

différents. Or, les fibres nerveuses qui recoivent l'excitation sonore (organe de Corti) sont en nombre supérieur à 3000 et possèdent au moins deux fibres radiales chacune ; on en conclut qu'il existe une fibre correspondant à chaque son musical et résonnant en même temps que lui ; la hautcur du son perçu dépend du rang de la fibre ébranlée.

Mais, tandis que le nombre des sons perceptibles semble limité, le nombre des couleurs différentes paraît être infini ; aussi ne peut-on admettre que la rétine possède une fibre nerveuse correspondante à chaque couleur.

Il est très généralement reçu que ce sont les bâtonnets qui rendent la rétine sensible à l'excitation lumineuse, et que les cônes donneraient la sensation colorée ; ces cônes manquent en effet chez les oiseaux nocturnes qui, vraisemblablement, ne perçoivent comme couleur que les dégradations du noir au blanc. Chaque bâtonnet, d'après Young, comprendrait trois sortes de fibres sensibles respectivement aux trois couleurs fondamentales. Ces dernières seraient pour Helmholtz, non plus le rouge, le jaune et le bleu, mais le rouge, le violet et le vert. Chaque espèce de fibre aurait son maximum d'impressionnabilité dans une région déterminée du spectre. La figure 48 reproduit les courbes de sensibilité, dessinées par Helmholtz pour chacune de ces trois sortes de fibres ; la courbe 1 représente la sensibi-

lité au violet, 2 au vert, 3 au rouge. Quand les excitations des trois fibres sont égales, on aurait la sensation du blanc; quand elles sont inégales, la sensation du blanc est celle de la couleur, celle-ci résultant de l'excès d'ébranlement de l'une ou de deux des fibres comparé à l'influx nerveux transmis par les deux autres ou par la troisième seule.

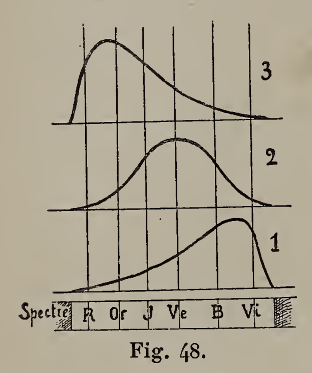


Fig. 48.

Ces courbes de sensibilité ont été construites en étudiant des sujets atteints de dyschromatospie, c'est-à-dire chez lesquels la vision des couleurs est anormale. La plupart sont aveugles pour l'une des couleurs fondamentales, le rouge le plus généralement (daltonisme). C'est de ceux qui ne distinguent pas le vert du rouge qu'on a dit fort justement que pour eux les cerises ne paraissent jamais mûres.

Disons en terminant que l'étude anatomique de la rétine et les particularités des vues anormales n'apportent aucune preuve décisive à la théorie que nous venons d'exposer. Bien que séduisantes au premier abord, les conjectures avancées par Helmholtz semblent peu soutenables. Si nous avons tenu à les rappeler, c'est qu'elles ont suggéré l'idée première

d'un procédé indirect de reproduction des objets colorés dont la théorie subsiste d'ailleurs en dehors de l'hypothèse des trois couleurs fondamentales (1).

## III

**Notions de photométrie. — Influence de l'éclairage sur les couleurs des objets. — Théorie des écrans colorés.**

Si l'on regarde un spectre solaire on ne le trouve pas également lumineux dans toutes ses parties ; l'éclat, très faible dans le rouge, semble augmenter progressivement jusque dans le jaune verdâtre pour diminuer ensuite du côté du violet.

Quand deux surfaces blanches et opaques, placées de la même façon par rapport à l'œil d'un même observateur, lui paraissent avoir le même éclat, on dit qu'elles reçoivent des quantités égales de lumière, qu'elles ont le même éclairement, et on désigne sous le nom d'éclairement moyen le quotient de la quantité de lumière qu'elles reçoivent par leur surface.

L'intensité d'une source lumineuse se définit par l'éclairement qu'elle produit sur un écran ayant

(1) Voir Ve partie.

pour surface l'unité de surface et placé à l'unité de distance de la source.

Mais, tandis que si l'on considère deux surfaces de même coloration, éclairées par de la lumière blanche et présentant à l'œil le même éclat, ces surfaces paraissent toujours, au même observateur avoir le même éclairement, qu'il en éloigne ou en rapproche son œil, pourvu que toutes deux restent à la même distance de cet œil ; au contraire, lorsque deux surfaces de couleurs différentes, l'une jaune, l'autre bleue, par exemple, offrent le même éclat pour un éloignement donné, lorsqu'on s'approche des deux surfaces, l'éclat de la jaune paraît devenir plus intense ; lorsqu'on s'en éloigne, c'est le bleu qui semble l'emporter. En général, quand deux couleurs semblent présenter un même éclat, sous un éclairage donné, l'éclat de la plus réfrangible paraît devenir plus intense que celui de l'autre, quand l'éclairage augmente pour les deux dans le même rapport, et moins intense quand il diminue (1).

L'expérience montre que si l'on fait varier l'éclairage d'une surface voisine d'une autre de couleur différente, mais d'éclairage constant, on peut faire en sorte que les deux surfaces arrivent à présenter

(1) Une grande partie de ce chapitre a été redigée d'après l'intéressant ouvrage de Calmette : Lumière, Couleur et Photographie. (Paris, Société d'Éditions scientifiques).

pour l'œil le même éclat ; on peut ainsi comparer les diverses couleurs d'un spectre avec une même surface blanche.

On peut aussi considérer deux lumières de couleurs différentes comme égales quand elles permettent l'une et l'autre de voir aussi distinctement des traits blancs sur fond noir ou des traits noirs sur fond blanc (Herschell). On déterminera, par exemple, la

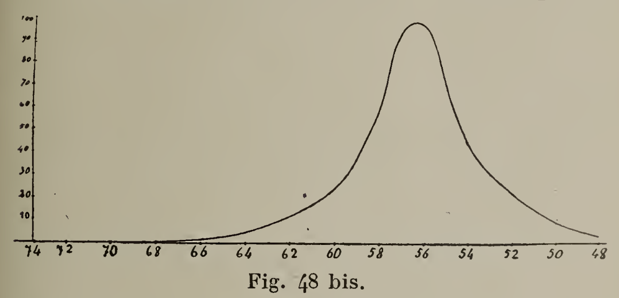



Fig. 48 bis.

quantité de lumière qu'on doit successivement laisser tomber sur un prisme pour lire avec la même netteté, dans les diverses parties du spectre, des nombres détachés d'une table de logarithmes : le pouvoir éclairant sera l'inverse de la quantité nécessaire. Cette méthode appliquée au spectre solaire a fourni la courbe de la fig. 48 bis, dont les abscisses représentent les longueurs d'onde, les ordonnées les pouvoirs éclairants correspondants.

Le maximum de cette courbe correspond à une longueur d'onde de $0\mu,564$ ; si on la compare à celle de la

répartition de l'énergie dans le spectre solaire on constate que le maximum de cette dernière correspond à une longueur d'onde très voisine à 0μ,58. Néanmoins ces deux courbes (fig. 49) reproduites à la même échelle sont loin de coïncider.

C'est que l'effet produit sur l'œil n'est pas proportionnel à l'énergie de la radiation qu'il reçoit.

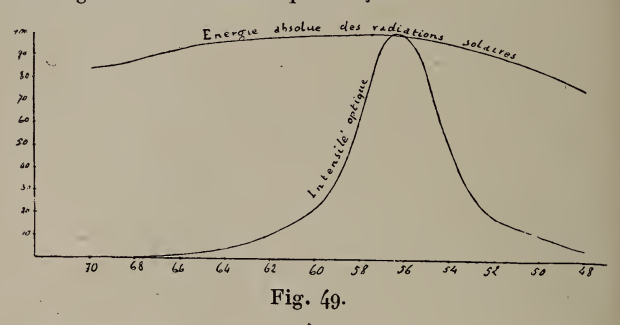



Fig. 49.

L'œil peut être considéré comme une machine transformant l'énergie lumineuse en énergie nerveuse et, comme dans toute machine, il y a déperdition de force vive, toute l'énergie incidente n'est pas transformée en influx nerveux, de même que dans la machine à vapeur, toute l'énergie calorifique n'est pas transformée en énergie mécanique. La perte (1) semble due 1° à l'échauffement, 2° à l'usure. C'est vraisemblablement pour permettre la reconstitution constante des éléments altérés (cônes et bâtonnets sans doute) que l'œil possède, même pendant une vision attentive, de petits mouvements de va-et-vient.

La proportion d'énergie utilisée par l'œil n'est pas la même dans toutes les régions du spectre ; le tableau sui-

(1) Bien entendu le mot « perte » ici pas plus qu'ailleurs, ne doit pas se prendre dans le sens absolu « d'anéantissement ». La fraction d'énergie, qualifiée perdue au point de vue de l'effet utile (production de l'influx nerveux) se retrouve en réalité employée tout entière à des transformations accessoires. Energie ou matière, rien ne se perd dans la nature.

vant indique, d'après Langley, la quantité minimum d'énergie que l'œil doit absorber par seconde dans les diverses parties du spectre pour pouvoir distinguer les chiffres d'une table de logarithmes :

| COULEURS | LONGUEURS D'ONDE | MINIMUM D'ÉNERGIE-SECONDE (en petites calories) |
|---|---|---|
| Violet. . . | 0μ40 | $\frac{1}{6{,}3 \times 10^{13}}$ |
| Vert . . . | 0,55 | $\frac{1}{1{,}5 \times 10^{16}}$ |
| Écarlate. . | 0,65 | $\frac{1}{6{,}6 \times 10^{13}}$ |
| Cramoisi . | 0,75 | $\frac{1}{3{,}3 \times 10^{10}}$ |

Comme on le voit, le minimum correspondant au jaune verdâtre, ou l'énergie d'une petite calorie (1) suffirait pour impressionner l'œil pendant 180 millions d'années !

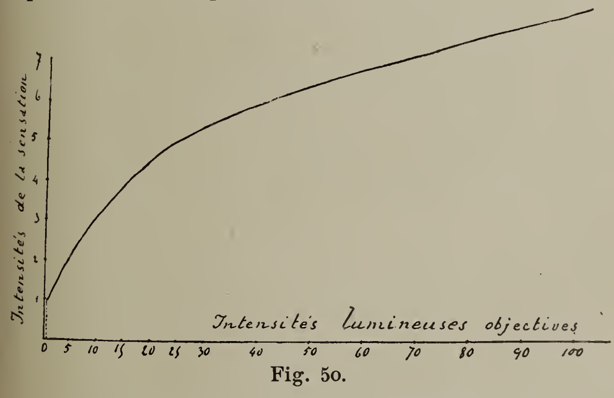



Fig. 50.

(1) On entend par « petite calorie » la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° centigrade la température d'un *gramme* d'eau.

De même l'énergie d'une petite calorie, transformée en énergie sonore, suffirait pour impressionner l'oreille plus de dix mille ans.

Quand la quantité de lumière augmente, l'intensité de la sensation produite n'augmente pas dans le même rapport ; la réunion de deux, de quatre quantités de lumières égales, ne donne pas une sensation deux, quatre fois plus vive. La sensation croît moins vite que l'excitation, comme si la nature se défendait contre une fatigue excessive. La courbe de la figure 50, qui résume les expériences de M. Charpentier, le montre amplement.

On a cru pendant longtemps que l'excitation variant en progression arithmétique, la sensation variait en progression géométrique (Loi de Fechner). La loi qui semble exacte est que la différence de sensation croît proportionnellement au logarithme de la différence d'intensité (1). Le Dr Broca a été amené à l'énoncer ainsi par l'examen du fait suivant : l'œil perçoit une différence entre deux plages lumineuses quand le rapport de leur différence d'intensité à l'intensité totale a une valeur à peu près constante.

On en déduit une importante conséquence :

L'éclairage relatif de deux objets restant constant, les sensations relatives changeront quand l'éclairage absolu changera. Le plus clair des deux objets paraîtra de plus en plus clair par rapport à l'autre, à mesure que la quantité de lumière diminuera. La courbe de la fig, 51 montre les variations de sensibilité de l'œil avec la quantité de lumière.

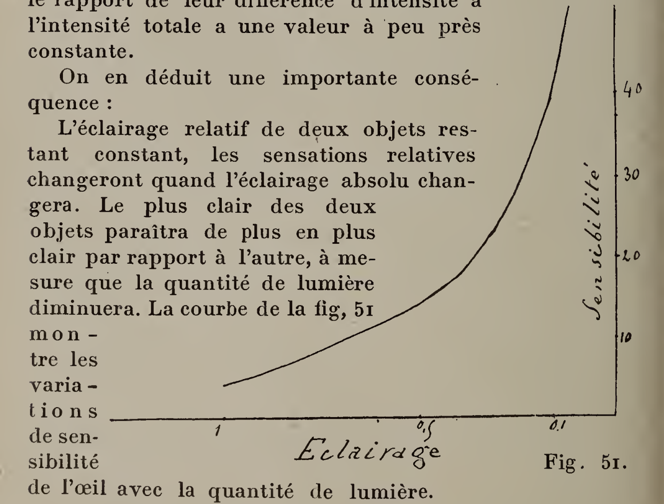



Fig. 51.

(1) Cette modification de la loi de Fechner, due au Dr Broca, peut s'écrire :

$$S - So = A\,[\log (I + a) - \log (Io + b)]$$

S, So, Io étant les sensations et les intensités, A, a et b des constantes.

Ainsi, au clair de lune ou au crépuscule, les contrastes sont plus heurtés qu'au milieu du jour.

*Intensité des diverses sources lumineuses. — Etude de divers éclairages et de leur influence sur la couleur des objets.* — On conçoit que la connaissance de l'intensité des sources lumineuses soit d'une grande importance en photographie, surtout quand on a soin d'étudier le spectre même de la source pour savoir quelles radiations elle est capable d'émettre, et quelle est l'intensité lumineuse dans les diverses régions de son spectre.

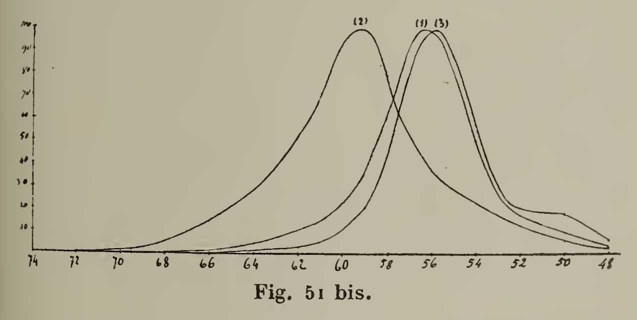



Fig. 51 bis.

La figure 51 bis montre les intensités relatives des radiations de longueurs d'onde différentes émises par diverses sources.

La courbe (1) représente l'intensité des divers rayons solaires ; la courbe (2), celle des radiations d'une lampe Carcel, pour lesquelles le maximum, égal à 100, correspond à la longueur d'onde $0^{\mu}59$ et est plus voisin du rouge que pour l'éclairage solaire.

Le gaz d'éclairage donne une courbe analogue ; l'arc électrique, la lumière obtenue par la combustion du magnésium contiennent plus de radiations bleues, violettes et ultra-violettes (1).

La courbe (3) représente les intensités dans les diverses régions du spectre de la lumière envoyée par un ciel bleu.

Pour mieux comparer ces nuances, il faut les considérer lorsque chacune d'elles envoie la même quantité de lumière ; les courbes prennent alors la forme de la figure 51 ter.

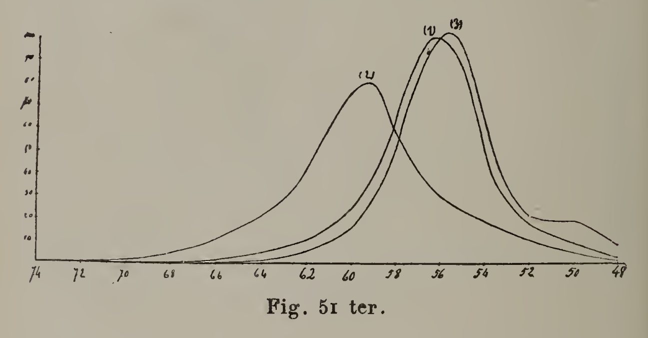



Fig. 51 ter.

Nous avons vu que la couleur d'un objet dépendait : 1° de la nature ; 2° de la lumière qui l'éclaire. Il est très intéressant de connaître la composition quantitative de la lumière qui est réfléchie par di-

(1) Nous extrayons la plupart de ces courbes et de ces résultats de l'excellente brochure de Calmette : Lumière, Couleur et Photographie, à laquelle nous renvoyons les lecteurs qui désireraient approfondir ces délicates questions.

vers objets colorés, c'est-à-dire la quantité de chaque radiation qu'ils renvoient, bien que les résultats varient forcément un peu, d'un échantillon à l'autre.

Pour faire cette étude, on reçoit les rayons solaires sur une couche de couleur ; on forme au spectroscope le spectre de la lumière qu'elle renvoie, et l'on compare avec un photomètre chaque radiation réfléchie à la radiation incidente de même longueur d'onde.

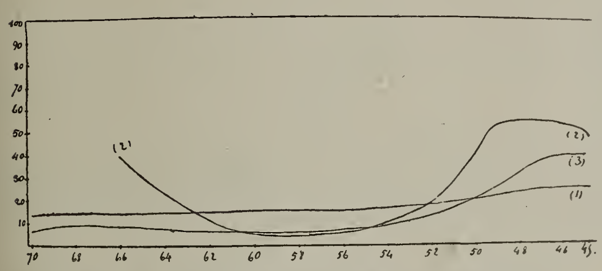



Fig. 52. — (1) indigo ; (2) cobalt ; (3) outremer.

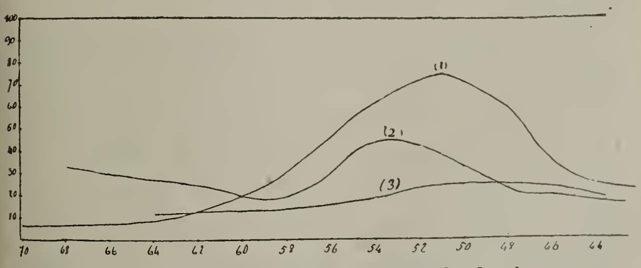



Fig. 53. — (1) vert émeraude ; (2) oxyde de chrome ; (3) terre verte.

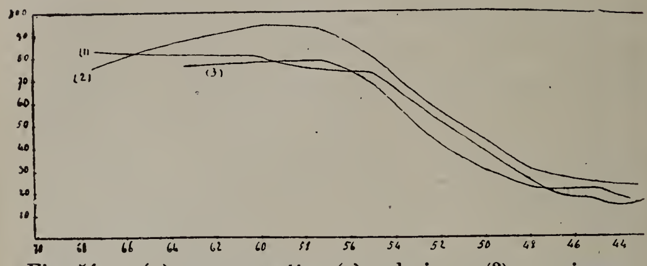



Fig. 54. — (1) gomme-gutte ; (2) cadmium ; (3) ocre jaune.

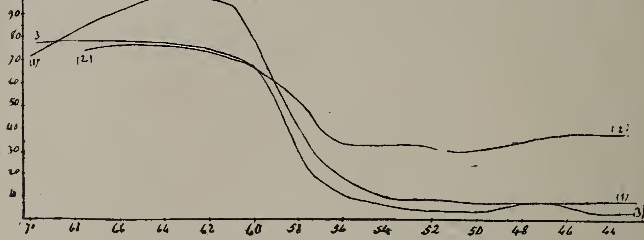



Fig. 55. — (1) vermillon ; (2) carmin ; (3) iodure de mercure.

Les figures 52, 53, 54, 55 montrent les résultats que donnent diverses couleurs bleues, vertes, jaunes et rouges.

On a supposé l'intensité de la radiation incidente égale à 100; l'ordonnée de la courbe en chaque point indique la quantité correspondante de lumière renvoyée (Abney). On remarquera la différence de composition de couleurs produisant le même effet sur l'œil, ce qui explique certaines anomalies observées dans la reproduction photographique des objets colorés.

La figure 56 représente les différences d'intensité dans les diverses régions du spectre de la lumière renvoyée par du vermillon éclairé successivement avec la lumière émise par une lampe (1), par le soleil (2), et par le ciel bleu (3).

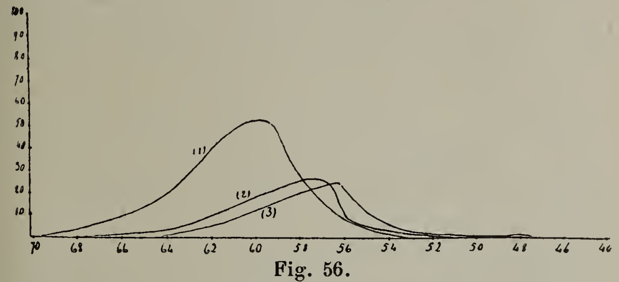



Fig. 56.

Comme on le voit, la teinte et l'éclat varient avec l'éclairage. A la lampe le vermillon paraît plus rouge.

En choisissant convenablement la lumière, on arrive d'ailleurs à faire paraître à volonté noire ou blanche une couleur quelconque.

Cette influence de l'éclairage est d'ailleurs bien connue : une dame ne choisit pas des étoffes de mêmes nuances pour une toilette de soirée, destinée à être vue aux bougies, et pour une toilette qui sera portée au grand soleil.

Une des couleurs dont la composition est le plus utile à connaître, est la couleur verte des végétaux. Tandis que si l'on étudie au spectroscope une matière colorante verte, la région du rouge manque complètement dans le spectre observé, les régions bleues

et violettes étant elles-mêmes très affaiblies ; au contraire, en examinant le spectre de la lumière émise par des feuilles vertes, nous y trouvons le rouge extrême, peu d'orangé, le jaune, le jaune verdâtre et le vert jaunâtre, puis un peu de vert pur, le spectre pâlissant de plus en plus à mesure qu'on s'approche du violet. La figure 57 représente

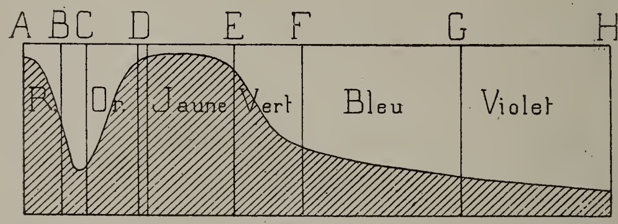



Fig. 57.

les variations d'intensité des radiations diffusées par les feuilles vertes dans les diverses parties de leur spectre d'émission. L'effet produit sur l'œil est la sensation du jaune verdâtre. Ceci n'a, bien entendu, lieu qu'à la lumière blanche du soleil. Cette propriété qu'ont les feuilles vertes de refléchir, contrairement aux matières colorantes vertes, les radiations rouges, explique pourquoi, sous l'action de la lumière rouge du soleil couchant, le feuillage prend une teinte rouge orange (1). Selon que le feuillage est éclairé par la

(1) Pour plus de détails, voir l'intéressant ouvrage de *N Rood* : Théorie scientifique des Couleurs, qui fait partie de la Bibliothèque scientifique internationale publiée par Alcan, à Paris.

lumière solaire directe, ou par cette même lumière réfléchie par le ciel bleu, il présente une teinte variant du jaune légèrement verdâtre au vert bleuâtre.

Ces faits montrent bien l'influence de la nature du corps et de la nature de l'éclairage sur la couleur des objets. On peut utiliser la propriété qu'ont les verres de couleur de ne laisser passer que les radiations de régions déterminées du spectre, pour modifier la composition d'un éclairage.

On désigne alors ces verres sons le nom d'écrans colorés. Nous avons déjà dit qu'un verre rouge, à la condition de n'avoir qu'une épaisseur déterminée, ne laissait passer que les radiations rouges ; on peut de même trouver des verres verts, bleus, transparents par les seules radiations vertes ou bleues du spectre.

Les figures 58 et 59 représentent les luminosités des

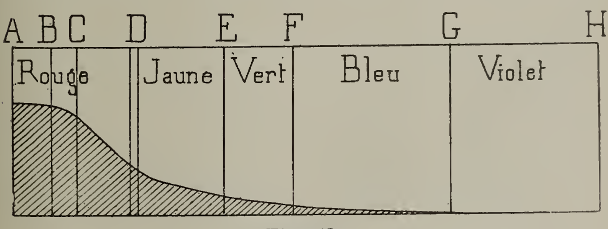



Fig. 58.

diverses radiations qui traversent un verre rouge et un verre vert. On voit que pour le verre rouge, la luminosité

ou l'intensité des radiations rouges transmises n'est guère que la moitié de l'intensité de ces mêmes radiations dans le spectre, l'intensité de la lumière orangée est beaucoup plus faible ; enfin l'intensité des radiations bleues et violettes qui traversent le verre est presque nulle. Le verre vert donne des résultats analogues (fig. 59) : il laisse passer beaucoup de radiations vertes et fort peu de radiations rouges et bleues.

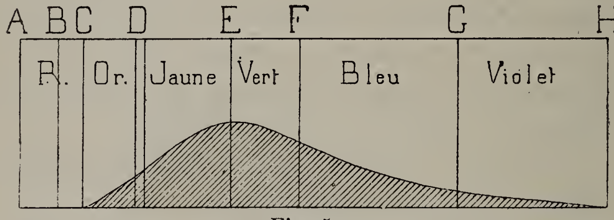



Fig. 59.

Ces résultats varient d'ailleurs avec l'épaisseur du verre qui, comme nous l'avons déjà dit, peut changer sa couleur. Ainsi la figure 60 représente, comme les précédentes, la répartition dans les diverses régions du spectre de l'intensité des différentes radiations transmises par un verre rouge, par un verre bleu et enfin par un verre vert assez mince ; ce dernier n arrête complètement aucune radiation.

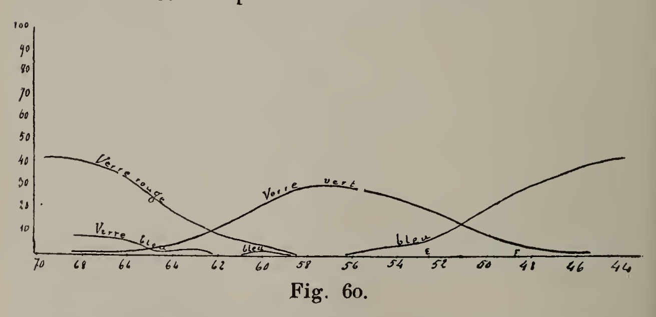



Fig. 60.

Au lieu de verres colorés, on peut employer comme écran des lames de gélatine colorées, ou

encore des écrans liquides, consistant en une cuve, à faces bien parallèles, formées de glaces transparentes, et contenant des dissolutions de liquides convenables. C'est ainsi qu'une dissolution de bichromate de potassium laisse passer les radiations jaunes, vertes et rouges ; et une dissolution d'hélianthine les radiations rouges et jaunes, seulement.

Si l'on prépare une dissolution de chlorophylle, cette substance qui, comme on le sait, donne aux feuilles leur coloration verte, on pourra, en en examinant le spectre d'absorption, étudier les radiations capables de la traverser (1).

On voit alors le spectre offrir les divers aspects retracés sur la figure ci-contre.

Les solutions concentrées laissent passer seulement une partie des radiations rouges ; leur spectre est caractérisé par une bande obscure occupant tout le spectre, sauf une fraction du rouge (fig. 61 I).

Les solutions convenablement diluées présentent une bande caractéristique dans le rouge, et absorbent l'orangé, le jaune, le bleu et le violet (III).

La bande d'absorption du rouge occupe une position fixe, et présente des contours nets, qu'il s'agisse d'une solution très étendue, ou même d'une

(1) La solution de chlorophylle se prépare en triturant dans un mortier, bien propre, préalablement lavé à l'eau distillée, quelques herbes vertes ou des feuilles sèches, les traitant par l'alcool absolu (à 90°), et filtrant.

solution altérée (IV) ; enfin, si l'on ajoute à la solution quelques gouttes d'un alcali, tel que l'ammoniaque ou la potasse, cette bande du rouge se dédouble en deux raies dont les positions restent fixes (V).

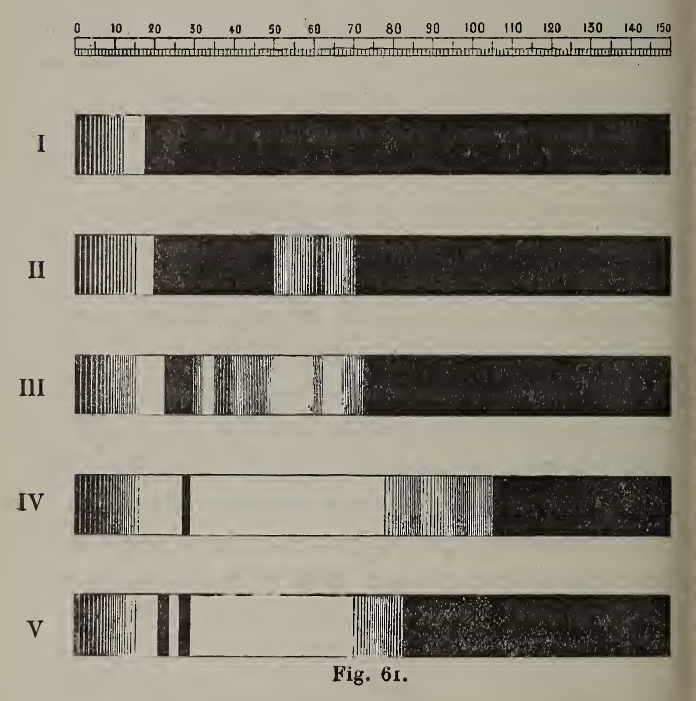



Fig. 61.

Les solutions de sang présentent des phénomènes analogues (figure 62) : concentrées, elles ne laissent passer que le rouge ; au 1/50e il y a deux raies d'absorption, l'une dans le jaune et l'autre dans le vert (figure 61, II. Le spectre I montre les raies

solaires). Si le sang contient certains corps, son spectre d'absorption prend des aspects différents selon ces corps (III), ce qui rend de très grands services en médecine légale.

« En superposant deux écrans colorés convena-
» blement
» choisis, on
» peut limi-
» ter davan-
» tage la
» lumière
» transmise.
» Mais il
» faut bien
» remarquer
» que l'effet
» de deux
» écrans su-
» perposés
» est égal,
» non pas à la somme des effets produits par
» chacun d'eux séparément, mais à leur produit.

Fig. 62.

» Ainsi, le verre vert de la figure 60 ne laisse
» passer que les 0,20 de la radiation correspondant
» à la raie E et les 0,05 de la radiation correspon-
» dant à la raie F ; lui superposant un verre
» identique, il ne laissera passer, pour E, que les
» 0,20 de ce qu'il recevra, c'est-à-dire 0,04, et pour

» F, les 0,05, c'est-à-dire 0,0025. *Le nombre des* » *écrans identiques croissant en progression arithmé-* » *tique, l'intensité d'une radiation transmise décroît* » *en progression géométrique*. La raison de cette » progression n'étant pas la même pour tout le » spectre, on comprend pourquoi la composition de » la lumière transmise change avec le nombre des « écrans ». (Calmette, *Lumière, Couleur et Photographie*). C'est ce qui explique les changements de couleur d'écrans identiques superposés.

La même loi est suivie par les radiations solaires traversant des couches atmosphériques de plus en plus épaisses.

## IV

### Historique et Principe de la Photographie.

On sait que si l'on perce une étroite ouverture dans le volet d'une chambre obscure, l'image des objets extérieurs vient se peindre sur le mur opposé. Pour une fente un peu large, cette image manque de netteté, et si l'on diminue l'ouverture, elle perd de son éclat. En agrandissant légèrement le trou du volet et en y plaçant une lentille convergente, l'image devient d'un dessin précis, pourvu que la lentille ait une distance focale convenablement choisie par rapport à l'éloignement du mur. Il y a intérêt à

recevoir l'image sur un écran mobile, c'est-à-dire sur une surface blanche de papier ou de toile tendue sur un châssis dont on peut faire varier la distance à la lentille. Quand on est parvenu, en déplaçant l'écran, à une position pour laquelle l'image est nette, on dit qu'elle est *au point*. Elle nous donne alors une reproduction réduite de la forme exacte et des couleurs des objets ; en outre, s'ils sont en mouvements on les voit se mouvoir sur l'écran.

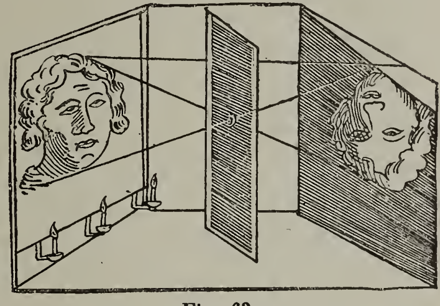
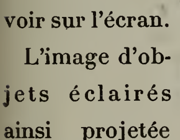


Fig. 63.



L'image d'objets éclairés ainsi projetée par une lentille jouit de ce privilège qu'elle semble toujours jolie alors même que l'objet nous est indifférent. Le plaisir qu'on éprouve à la regarder, plaisir qui a peut-être ses raisons en dehors de la physique pure, a sans doute contribué pour une part à inspirer les créateurs de la photographie en leur donnant le désir de rendre permanente l'image fugitive de la chambre noire avec son modelé, son mouvement et son coloris.

Ce triple problème est actuellement résolu ; trois noms français sont attachés aux découvertes successives qui ont été réalisées. Avec Daguerre, Marey

et M. Lippmann, qui ont respectivement fixé le modelé, saisi le mouvement et reproduit la coloration des objets, la photographie, née en France, y a atteint également son épanouissement terminal.

Chacun a pu se faire une idée plus ou moins vague des actions chimiques que peut provoquer la lumière. Tout le monde a vu les couvertures de livres ou de journaux exposés à la devanture des libraires pâlir et s'effacer plus ou moins, il en est de même des étoffes dites de mauvais teint ; elles passent au soleil.

Il semble que l'énergie lumineuse se transforme ici en énergie chimique ; mais plus probablement elle ne fait que fournir le travail préliminaire nécessaire pour amener certains corps à un état tel qu'ils se combinent ou se décomposent directement. C'est ainsi que si l'on expose au soleil, un ballon contenant des volumes égaux de chlore et d'hydrogène, ces deux gaz se combinent immédiatement avec explosion pour donner un gaz nouveau, l'acide chlorhydrique. Comme on peut amener le mélange de l'obscurité à la lumière, en un temps excessivement court, le travail de la lumière semble se faire avec une très grande rapidité. Au reste, si dans ce cas du chlore et de l'hydrogène, il suffit que la lumière solaire tombe sur un seul point du mélange, il en est beaucoup d'autres où elle doit, pour que l'action chimique ait lieu, s'exercer sur

toute la surface du corps et d'une manière continue.

C'est principalement sur une action de cette dernière catégorie qu'est basée la photographie.

Un alchimiste, Fabricius, vivant au milieu du XVI[e] siècle, a, le premier, observé le phénomène suivant : ayant jeté du sel marin dans la solution du sel d'argent, il vit se former un précipité blanc, cailleboté, qu'il nomma « lune cornée » et qu'on appelle, maintenant, chlorure d'argent. Ayant laissé ce produit exposé aux rayons solaires, Fabricius eut la surprise de voir la substance, blanche comme du lait, noircir à la lumière. L'alchimiste poussa même plus loin ses reeherches, car, dans son livre des métaux publié en 1556, il raconte que si l'on projette, au moyen d'une lentille convergente, sur un écran enduit de cet « argent corné » l'image d'objets quelconques, cette image se fixe en noir et en gris, suivant que les parties en sont éclairées par la lentille ou par la lumière diffuse. Mais Fabricius se borna à cette remarque qui passa inaperçue. En 1760, un écrivain bizarre, Tiphaine de la Roche, sans peut-être avoir lu Fabricius, devina la photographie et même la photographie des couleurs, comme on le verra dans un passage de son livre que nous citerons plus loin (IV ch. I). Mais, pas plus que Cyrans de Bergerac, qui avait, entre autres merveilles, prophétisé les ballons, Tiphaine de la Roche n'essaya de traduire dans la pratique ses rêveries ou scs pressentiments.

Vers 1780, le physicien Charles se servit du chlorure d'argent pour reproduire les silhouettes de personnages qu'il interposait entre la couche sensible et une source de lumière. Ni lui, ni Wedgwood, ni J. Wat, ni Davy, qui étudièrent la question, n'arrivèrent à fixer ces images. Il nous faut aller jusqu'en 1833 pour trouver le problème résolu par deux français, Daguerre et Joseph Nicéphore Niepce (de Châlons).

Un grand nombre de matières organiques (essenccs diverses, vernis, etc.) s'oxydent sous l'action de la lumière. En particulier le bitume de Judée, qui a subi cette

action, devient insoluble dans l'essence de lavande, c'est en se basant sur cette propriété que Niepce, après de longues recherches (1813-1829), réussit à fixer pour la première fois l'image de la chambre noire. Vers 1829, Niepce s'associa à Daguerre qui, poursuivant les expériences après la mort de son associé, inventa à son tour un procédé particulier, la daguerréotypie, dans laquelle l'image, formée sur une plaque d'argent iodúrée à sa surface, se fixe par l'hyposulfite de soude.

Un véritable enthousiasme accueillit l'annonce de cette découverte. Le Parlement, à titre de récompense nationale, vota une pension annuelle et viagère de 6.000 francs à Daguerre et de 4.000 francs au fils de Nicéphore Niepce, Isidore Niepce. L'émotion fut telle chez les artistes que Paul Delaroche s'écriait déjà en montrant un daguerréotype : « La peinture est morte à dater de ce jour ». C'était aller trop loin ; les arts, à la différence d'autres royautés plus bruyantes quoique moins rassurées, s'entr'aident et ne se détrônent pas. Mais l'exclamation montre bien l'importance attachée à la nouvelle dès son apparition.

Cependant, bien des progrès restaient à réaliser. On ne pouvait encore obtenir à la fois qu'une seule image, le temps de pose nécessaire pour que la lumière impressionnât la plaque était très long ; le dessin, enfin, était vu retourné comme dans un miroir. Les perfectionnements ne se firent pas attendre. Un an après la divulgation du daguerréotype, Fox Talbot, en Angleterre, arriva à fixer l'image produite par la lumière sur le chlorure d'argent, et à obtenir des photographies sur papier.

Un avantage important en résulta avec ces clichés, les blancs de l'objet viennent en noir sur l'image, et

les noirs en blancs ; on avait une image négative, un phototype comme on l'appelle maintenant (fig. 64). Mais il était alors facile de reproduire cette image en appliquant contre le type négatif un second papier sensible et en exposant le tout à la lumière de façon que celle-ci traversât la première image avant d'arriver au papier sensible ; celui-ci s'impressionne et les noirs et les clairs du négatif viennent respectivement en clairs et en noirs sur la nouvelle image qui se trouve ainsi donner, en définitive, les teintes réelles de l'objet primitif (fig. 65). Rien n'empêche avec un seul négatif d'obtenir par le même procédé, un nombre théoriquement indéfini de positifs. Ce mode opératoire fut introduit en France par



Fig. 64. — La place de Nancy (Négatif)



Fig. 65. — La place de Nancy (Positif)

Blanquart-Evrard; Niepce de Saint-Victor, le neveu de Nicéphore Niepce, eut l'idée de remplacer le papier par du verre, comme support de la couche sensible.

Tandis que le bitume de Judée et différents vernis s'oxydent directement à la lumière, plusieurs substances telles que le collodion, la gélatine, l'albumine, le papier, le bois, etc., ne s'oxydent sous la même influence que s'ils sont en contact avec d'autres matières contenant de l'oxygène et capables de l'abandonner facilement, telles que l'azotate d'argent, l'azotate d'urane, les bichromates, etc. Dans le cas de l'azotate argentique par exemple, l'hydrogène de la matière organique s'unit à l'oxygène de l'azotate, laissant ainsi en liberté l'argent qui donne à la préparation sensible la teinte noire qu'elle prend à la lumière.

L'hydrogène de la matière organique peut également se combiner à des corps autres que l'oxygène, pour lesquels il offre aussi de l'affinité, comme on dit en chimie, tels que le chlore, le brome, l'iode. Mais avec eux l'action de la lumière n'est pas tout d'abord visible ; elle reste cachée, latente et ne se montre que si on en provoque la manifestation au moyen d'un agent auxiliaire capable de s'oxyder, — d'un réducteur selon l'expression usitée, — qui révèle l'image latente. Le travail préliminaire de la lumière a ici pour effet d'amener la matière organique à un

état tel que sous l'influence de l'agent révélateur, son hydrogène s'unisse au chlore, brome, iode de la matière sensible, chlorure, bromure ou iodure d'argent, qu'on lui a incorporée.

Dès 1849, Legray proposa de mettre le corps sensible dans du collodion ; Archer et Fry publièrent les premières formules réellement applicables. Le principe de ce procédé est assez simple : on étend sur une glace de verre du collodion, c'est-à-dire une dissolution de coton-poudre (ou pyroxyle) dans un mélange d'alcool et d'éther, après l'avoir additionné d'un iodure ou d'un bromure alcalin soluble. Dès que cette préparation a fait prise, on plonge la plaque dans une solution d'azotate d'argent, au contact de laquelle les bromures et iodures prennent l'argent pour former du bromure et de l'iodure d'argent qui restent dans le collodion, tandis que le métal alcalin s'unit à l'acide azotique de la solution d'argent pour donner un azotate qui reste dans l'eau. La plaque encore humide et imprégnée d'azotate d'argent, est alors exposée dans la chambre noire où l'on projette sur elle l'image des objets à reproduire. Elle est rapportée ensuite dans un laboratoire, éclairé à une lumière jaune de même que le laboratoire où elle a été sensibilisée, puis plongée successivement dans un bain capable de révéler l'image latente, c'est-à-dire de produire la décomposition préparée par le travail de la lumière, et

dans un bain destiné à fixer cette image, c'est-à-dire à faire disparaître les sels non impressionnés qui, sans cette précaution, s'altéreraient eux-mêmes à une nouvelle exposition à la lumière, en recouvrant l'épreuve d'une couche uniformément noiré.

Cette émulsion présente un inconvénient ; elle ne se conserve pas ; il faut l'employer humide (collodion humide) (1). Aussi a-t-on cherché à obtenir des préparations sèches qui pussent se garder en réserve (collodion sec). Le principe consiste à incorporer à la couche de collodion une substance qui lui garde un peu de perméabilité et à éliminer toute trace d'azotate d'argent susceptible d'empêcher la conservation des plaques. Ce dernier résultat s'obtient par des lavages répétés. Quant aux substances destinées à donner de la perméabilité, Taupenot utilise l'albumine, Russell le tannin, d'autres la dextrine, le sucre, le café, le thé, le miel, la gomme, etc.

Mais l'élimination de l'azotate d'argent, ayant diminué la sensibilité de la couche impressionnable, on dut chercher à l'augmenter et l'on fut amené à remplacer d'abord une grande partie, puis tout l'iodure par du bromure. On avait ainsi dans le collodion une émulsion de bromure d'argent.

C'est alors qu'à la suite des travaux de Maddox,

(1) Voir Davanne. — Invention et applications de la photographie. — Conférence du 22 novembre 1894 au Conservatoire des Arts et Métiers, Paris. Gauthier-Villars.

King, Burgess, Kennett, Wraten et Wright, on eut l'idée de remplacer le collodion par la gélatine et qu'on fit ainsi les émulsions au gélatino-bromure d'argent.

Proposé par Poitevin, quinze à vingt ans auparavant, cet emploi de la gélatine ne devint général que lorsque Bernet, en Angleterre, eût montré que la maturation, c'est-à-dire le fait de laisser le mélange gélatiné vieillir à l'état humide pendant plusieurs jours, donnait à l'émulsion au gélatino-bromure une sensibilité complètement inattendue (1).

Depuis, la photographie a excité partout un véritable engouement auquel tout le monde, aujourd'hui, quelle que soit sa profession ou son sexe, a plus ou moins sacrifié.

Les plaques au gélatino-bromure se traitent comme celles au collodion : c'est-à-dire qu'on les révèle d'abord dans un bain convenablement choisi (oxalate ferreux, pyrogallol, hydroquinone, etc.), pour les fixer ensuite, en les plongeant dans une solution d'hyposulfite de sodium à 20 o/o. Les procédés au gélatino-bromure sont, au reste, ceux dont nous allons nous occuper spécialement.

(1) On est arrivé avec ces émulsions à fabriquer des plaques d'une sensibilité telle, que le Dr Marey a pu obtenir des images en $\frac{1}{25000}$ de seconde.

## V

### Fabrication des plaques

Les plaques au gélatino-bromure se trouvent toutes préparées dans le commerce et se conservent assez longtemps. Aussi est-il rare que le photographe, le professionnel pas plus que l'amateur, les fabrique lui-même. Il est bon, néanmoins, de savoir comment se pratique cette fabrication, et de posséder au besoin des notions suffisantes pour pouvoir s'y livrer en cas de nécessité.

On commence par préparer une émulsion de gélatino-bromure d'argent, c'est-à-dire une sorte de dissolution incomplète de bromure d'argent dans la gélatine, analogue au beurre dans le lait.

Un grand nombre de formules ont été données à cet effet ; dans toutes, on obtient le précipité de bromure argentique dans la gélatine, par double décomposition, en versant une solution d'azotate d'argent dans une solution chaude de gélatine renfermant un bromure alcalin ; puis on lave, pour se débarrasser de l'excès d'azotate d'argent. Voici une des formules et un des modes opératoires les plus pratiqués (1).

(1) Pour plus de détails, voir l'excellent Dictionnaire de chimie photographique de H. Fourtier. — Paris, Gauthier-Villars.

On prépare :

A. — Une solution de gélatine renfermant un bromure alcalin :

| | | |
|---|---|---|
| A | Eau . . . . . . . . . . . . . . . . | 100 gr. |
| | Bromure d'ammonium . . . . . . . | 145 gr. |
| | Gélatine demi-dure . . . . . . . . . | 2 gr. |

On ajoute la gélatine à la solution aqueuse du bromure, dans laquelle on la laisse gonfler environ une demi-heure.

B. — Une solution argentique ou bain sensibilisateur :

| | | |
|---|---|---|
| B | Eau . . . . . . . . . . . . . . . . | 1000 gr. |
| | Azotate d'argent . . . . . . . . . . | 18 gr. 5. |
| | Ammoniaque . . . . . . . . | quantité suffisante. |

On ajoute à la solution d'azotate d'argent l'ammoniaque goutte à goutte jusqu'à redissolution du précipité formé.

C. — Une solution de gélatine destinée à parfaire l'émulsion :

| | | |
|---|---|---|
| C | Gélatine dure. . . . . . . . . . . | 12 gr. 5. |
| | Eau. . . | quantité nécessaire pour la couvrir. |

On laisse la gélatine gonfler environ une heure dans cette solution ; au bout de cette heure, on jette l'excès d'eau non absorbé par la gélatine que l'on fond au bain-marie ou mieux dans l'appareil Voirin à cuire et filtrer la gélatine à 60° (fig. 66).

D'autre part, on a fait fondre à 50° la solution de gélatine bromurée A.

Fig. 66.

Une fois ces opérations effectuées à la lumière du jour si on le désire, on continue la préparation dans un laboratoire éclairé par des verres rouges; mais un tel éclairage a l'inconvénient de fatiguer la vue. Aussi dans beaucoup d'usines, en particulier dans celle des frères Lumière, une des plus vastes de France, le remplace-t-on par un éclairage obtenu au moyen de la superposition d'un verre jaune et d'un verre vert.

C'est dans une pièce ainsi éclairée à la lumière

rouge ou par des carreaux jaunes et verts superposés, qu'on verse la solution d'azotate d'argent (solution B) dans la solution A de gélatine bromurée, en ayant soin de le verser peu à peu et d'agiter le flacon ou le récipient contenant A après chaque addition de la solution B.

On ajoute, ensuite, par petites portions et en agitant après chaque addition, la gélatine dure C, puis on laisse le tout en bain-marie environ une heure, à une température voisine de 37°, mais ne dépassant jamais 40°.

Examinant de temps à autre par transparence, une goutte de l'émulsion portée sur une plaque de verre, on laisse l'émulsion elle-même dans le bain-marie jusqu'à ce que la prise d'essai présente par transparence une teinte bleue verdâtre. On la coule alors dans une cuvette refroidie dans l'eau et on attend que l'émulsion fasse prise.

Pour la laver, on la coupe en menus fragments au moyen d'une spatule de verre ou d'une cuiller d'argent, et on entoure ces menus fragments d'une mousseline ou canevas de mailles ayant au moins $0^{m},03$ de largeur; on plonge le tout dans un verre plein d'eau et on tord le canevas comme l'on essore le linge, ce qui fait sortir l'émulsion en filaments vermiformes. L'émulsion est alors soumise, durant environ trois heures, à un lavage dont l'eau, renouvelée toutes les cinq minutes, entraîne

les azotates alcalins et l'excès d'azotate d'argent. Après ce lavage, on débarrasse l'émulsion de la plus grande partie de son eau, on la fond au bain-marie à environ 40°, et on la filtre dans un entonnoir à filtrations chaudes, tel que ceux, très commodes, de Voirin.

On peut alors soit employer immédiatement l'émulsion filtrée, soit, ce qui vaut mieux, la faire mûrir en la laissant cinq ou six jours dans l'obscurité, recouverte d'une couche d'alcool. Un autre procédé de maturation consiste à remplacer le traitement à froid, soit par une coction d'une à deux heures à 100°, soit par l'addition d'ammoniaque suivie d'une demi-heure de cuisson à la température de fusion.

Il ne reste plus qu'à fondre de nouveau l'émulsion et à l'étendre sur glace. Cet étendage se fait dans l'industrie au moyen de machines spéciales assez compliquées qui permettent d'opérer sur des glaces de large surface qu'on découpe au diamant, selon les formats usités, pour en faire des paquets de six, destinés à être enfermés deux par deux dans des boîtes en carton et livrés ainsi à la consommation.

L'amateur pourra procéder de la manière suivante: il nettoiera la lame de verre destinée à recevoir la couche sensible, choisie bien plane et sans défauts, dans un bain d'eau acidulée, la rincera, l'essuiera et frottera le côté réservé pour recevoir l'émulsion avec

un tampon de toile imbibé d'une solution à 2 °/。 de silicate potassique.

L'émulsion, fondue au bain-marie dans une petite cafetière en porcelaine à bec, dite verseuse, est versée sur la plaque tenue par un coin et balancée doucement jusqu'au commencement de la prise ; on la pose alors sur un plan bien horizontal, un support à vis calantes par exemple, tel que celui de la figure 67, fabriqué par Voirin.

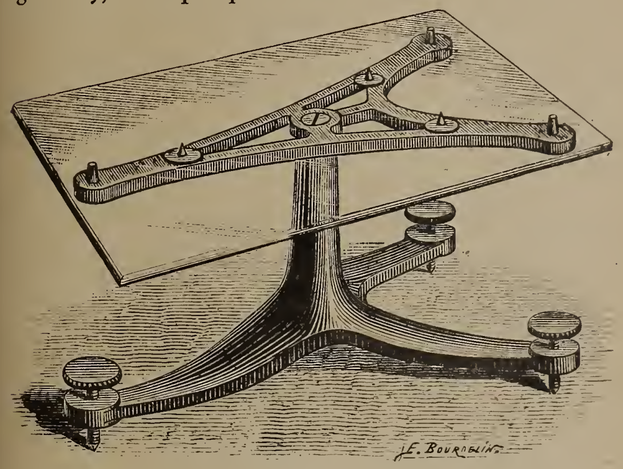



Fig. 67.

On peut obtenir un étendage plus régulier en se servant de la tournette représentée par la figure 68, dont la rotation uniformise l'épaisseur de la couche ; il est bon de recouvrir la tournette d'un couvercle en carton ou en bois, comme celle de la figure 69.

Dès que l'émulsion a fait prise sur la glace, on

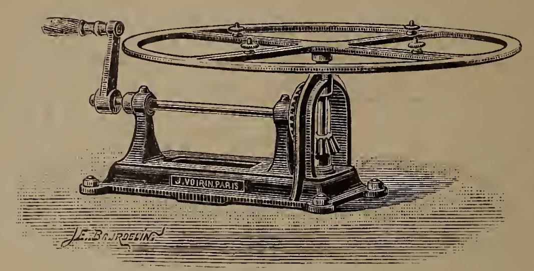



Fig. 68.

met celle-ci dans un séchoir tel que celui de la figure 70, simple caisse en bois surmontée d'une

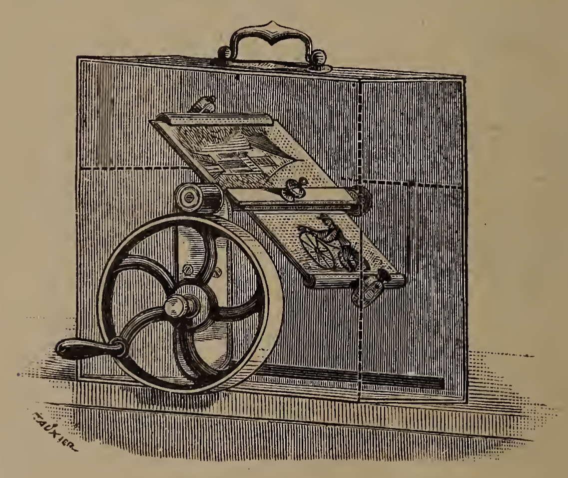


Fig. 69.

cheminée dans laquelle on allume une veilleuse pour

faciliter la ventilation ; l'air entre et sort par un tube plusieurs fois recourbé et à intérieur noirci pour empêcher la pénétration de la lumière.

On peut opérer de même pour obtenir des émulsions au gélatino-chlorure, bien moins sensibles mais utilisées, comme nous le verrons, pour les procédés positifs ; la seule différence est que l'on remplace le bromure alcalin par un chlorure.

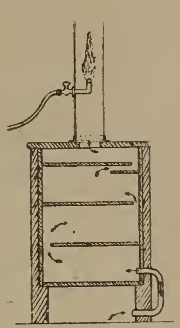


Fig. 70.

Au lieu d'avoir l'émulsion sur glace, on peut la vouloir sur papier. Dans ce cas on la verse d'abord sur verre très propre, non silicaté, et on recouvre ensuite la couche ainsi obtenue, dès sa prise en gelée, de la feuille de papier qui doit servir de support humide et qu'on a soin de découper un peu plus large que la glace ; une raclette en caoutchouc passée au-dessus chasse les bulles d'air interposées et favorise le contact... Aussitôt terminé, le séchage, qui s'opère comme pour les glaces, on détache le papier qui entraîne avec lui l'émulsion.

## VI

### L'appareil photographique.
### Obtention du phototype négatif.

L'appareil photographique se compose essentiellement d'une chambre noire munie d'un objectif, c'est-à-dire d'un système optique convergent. A la partie postérieure de la chambre se trouve une glace dépolie sur laquelle vient se dessiner l'image des objets placés devant l'appareil (fig. 71). La formation de ces images s'opère par un mécanisme analogue à celui de l'œil lui-même. L'objectif représente le cristallin ; l'air qui remplit la chambre noire remplace l'humeur



Fig. 71.

aqueuse ; la glace dépolie (ou la plaque sensible que l'on met à sa place) joue enfin le rôle de la rétine (fig. 72). Mais l'appareil photographique offre cet avantage d'être un œil impersonnel ; aussi Janssen a-t-il dit : « la plaque photographique est la rétine du savant ».

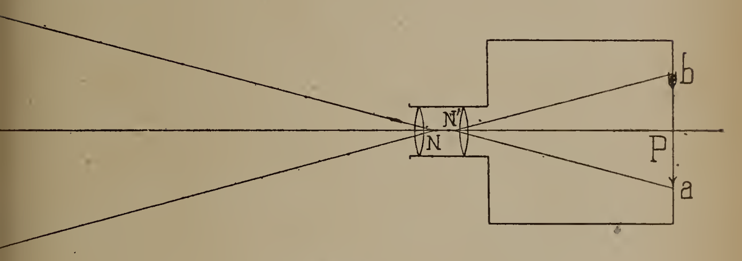



Fig. 72.

Un diaphragme convenablement disposé permet, comme l'iris par rapport à l'œil, de diminuer à volonté la section du faisceau lumineux qui pénètre dans la chambre photographique. Mais, à l'inverse de ce qui se passe pour l'œil, grâce à l'accommodation, l'objectif garde ici une puissance constante, sa distance focale n'étant pas susceptible de varier. Aussi, pour avoir une image nette, est-on forcé de reculer ou d'avancer l'arrière de la chambre qui se meut sur le chariot au moyen d'une crémaillère. Dans les anciennes chambres, l'arrière et l'avant étaient réunis par des parois de bois que l'on remplace aujourd'hui par le dispositif connu sous le nom de soufflet.

La chambre peut être placée sur un pied plus ou moins volumineux selon qu'elle est destinée à fonctionner à l'atelier ou à prendre des vues au cours d'une excursion.

La plaque sensible est disposée au fond de la chambre dans un châssis, c'est-à-dire dans une sorte de cadre-étui, où elle est protégée contre la lumière par des volets ou rideaux fermés jusqu'au moment de la pose (fig. 72 bis). Pour « charger » les châssis, l'opérateur doit être dans un cabinet noir ou dans une pièce éclairée seulement par de la lumière rouge. Il reconnaît, au toucher, la face sensible de la plaque à ce que cette face est mate et moins froide que l'envers. La face sensible, une fois la plaque dans le châssis, doit être tournée vers le dehors, le côté non sensible étant appuyé sur le fond du cadre. Au bout de peu de temps, on est assez habitué pour faire cette opération dans une obscurité complète.



Fig. 72 bis.

L'installation d'un atelier de pose, indispensable pour des travaux suivis, est assez délicate. L'éclairage viendra, autant que possible, du Nord, ou au moins du N.-N.-E. ou du N.-N.-O. La hauteur de l'atelier ne devra guère dépasser $2^m,80$. Le milieu seul sera vitré et des jeux de rideaux bleus ou jaunes permettront de régler l'arrivée de la lumière.

Dans l'atelier, l'appareil est monté à poste fixe. Quand on opère au dehors, il faut tout d'abord procéder à son installation. Pour cela, on commence par fixer solidement le pied en serrant les vis de manière à empêcher toute vibration. La chambre fermée une fois en place sur la tête du pied, on relève et on arrête le corps de l'appareil puis on tire la partie postérieure qui contient la glace dépolie sur laquelle on va faire la mise au point : l'opérateur, entourant sa tête d'un voile noir pour empêcher l'accès de la lumière diffuse, cherche à obtenir sur la glace une image aussi nette que possible, de son sujet. Une crémaillère permet, à cet effet, de déplacer d'une façon progressive l'arrière de la chambre.

Si le sujet à photographier présente plusieurs plans, on ne peut les mettre exactement au point à la fois. Il y a donc là une question de choix à faire — c'est-à-dire une question artistique. Pour le portrait, on mettra au point sur les paupières, les cheveux ou la barbe. En vertu de la profondeur du foyer, le reste sera sensiblement net, surtout si l'on emploie un diaphragme. Pour un paysage, on devra apprécier quel est le « motif » à faire valoir; d'ailleurs, à partir d'une distance égale à cent fois la distance focale principale de l'objectif, tous les plans sont sensiblement au point.

Ces opérations préliminaires terminées, on ferme l'objectif avec l'obturateur, on enlève la glace

dépolie et on met le châssis à sa place, en ayant soin de l'apporter dans une étoffe noire. On ouvre alors le volet qui découvre la surface sensible.

Il ne reste plus qu'à procéder à la pose, qui s'opère de la façon la plus simple, en ôtant l'obturateur et en le replaçant après le temps jugé nécessaire à l'impression.

Quelle doit être cette durée de la pose? Le problème est d'un genre moins simple que l'opération elle-même; il ne se résout théoriquement qu'à l'aide du calcul infinitésimal.

Hâtons-nous d'ajouter, pour n'effrayer aucune bonne volonté, que l'amateur — pas plus que le professionnel — n'a besoin de recourir à ce calcul. L'expérience apprend vite combien de temps il faut poser pour obtenir un phototype satisfaisant. Nous dirons seulement que le temps de pose est proportionnel au carré de la distance focale de l'objectif, et varie également en raison inverse du carré du diamètre du diaphragme. Notons pour ce dernier point qu'en général les diaphragmes, comme l'a recommandé le Congrès international de photographie, sont numérotés, chaque numéro exigeant un temps de pose double du précédent. Il n'y a donc ici qu'à lire un chiffre.

D'une manière générale, le temps de pose devra être d'autant plus long que le sujet est plus près de l'appareil. Pour les grandes vues panoramiques, il sera court, une fraction de seconde en plein soleil. Il ira jusqu'à dix et douze secondes pour les sous-bois.

La pose étant terminée, on referme le volet du châssis, on retire ce dernier, on ôte la plaque impressionnée et l'on continue avec les plaques restantes s'il y a lieu. Les plaques ainsi posées peuvent être conservées des mois entiers dans l'obscurité avant d'être soumises au bain révélateur qui, comme l'in-

dique son nom, est destiné à faire apparaître l'image latente fixée sur la plaque. L'ensemble des manipulations nécessaires constitue ce qu'on appelle le développement du cliché ou, pour employer l'expression adoptée par le Congrès, du phototype négatif; négatif, nous le rappelons, en ce sens que les parties blanches de l'objet photographié y sont représentées par des noires, et inversement.

Le développement présente une importance considérable; car c'est à lui seul qu'on peut demander de réparer les mal-venues provenant d'une appréciation erronée du temps de pose, c'est-à-dire d'une exposition de la plaque trop prolongée ou trop courte. Il peut se faire dans n'importe quelle pièce pourvu :

1° Qu'elle soit absolument obscure (le moindre filet de lumière blanche doit être exclu);

2° Qu'on y ait de l'eau à sa disposition, soit une simple cruche, soit mieux encore un robinet d'eau au-dessus d'un évier.

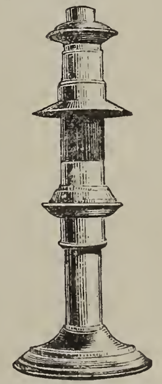


Fig. 73.

Les murs du laboratoire pourront être peints de n'importe quelle couleur; cependant, le blanc est préférable, car il renvoie mieux la lumière et n'offre aucun danger si le mode d'éclairage employé n'émet pas de la lumière inactinique. Les lanternes à gaz, à pétrole ou même à bougies sont excellentes (fig. 73.)

Comme il est bon de s'éclairer suivant les cas avec de la lumière rouge ou avec de la lumière jaune, on aura soin de pouvoir remplacer à volonté dans la lanterne employée les verres rouges par des verres jaunes.

Il ne faut pas traiter indifféremment tous les clichés, quelle que soit la durée d'exposition qu'ils aient subi, dans un même bain de composition invariable. Si l'on veut corriger les écarts de pose, on devra au contraire se rendre soigneusement compte de la venue de l'image et composer le bain révélateur d'après cette venue, exactement comme un peintre à la sépia renforce ou diminue la totalité de la teinte qu'il emploie. Tout l'effet artistique en dépend.

Nous allons passer successivement en revue les révélateurs aux sels ferreux, les révélateurs à l'hydroquinone, et enfin les révélateurs au pyrogallol, improprement appelé acide pyrogallique. Avec tous, nous le répétons, les écarts de pose peuvent être corrigés s'ils n'ont pas été par trop considérables. On sait, en effet, que quand la pose a été de beaucoup plus prolongée qu'il n'eût fallu, quand il y a eu, selon le mot technique, surexposition, au lieu d'obtenir un négatif, on ne retire du châssis qu'un phototype uniformément noir, ou même qu'une épreuve positive, selon le degré de l'exagération.

On se sert souvent comme révélateur de l'oxalate ferreux, obtenu par le mélange de deux solutions saturées d'oxalate neutre de potassium et de sulfate de fer au minimum (ou sulfate ferreux) dont voici les formules.

| | | |
|---|---|---|
| A | Eau distillée . . . . . . . . . . . | 1.000 |
| | Oxalate neutre . . . . . . . . . . | 300 |
| B | Eau . . . . . . . . . . . . . | 3 parties |
| | Sulfate de fer . . . . . . . . . . | 1 partie |

Le mélange de trois parties de la solution A avec une partie de la solution B, additionnée de quelques gouttes du modérateur suivant :

| | |
|---|---|
| Eau. . . . . . . . . . . . . . . . | 1.000 |
| Bromure de potassium . . . . . | 100 |

constitue le bain reconnu par le Congrès de photographie comme type de *bain normal.* Il est utile en particulier pour étudier certaines variations de sensibilité des plaques ; mais, lorsqu'il ne sagit plus de recherches théoriques, on procède par additions successives de B dans A, afin de pouvoir suivre, comme nous l'avons dit, la venue de l'image. Ainsi, trois parties de la solution A étant versées dans une cuvette à fond plat, on y verse seulement quelques gouttes de la solution A, et on y plongera la plaque à développer. Si l'image n'apparaît pas assez vite ou manque d'intensité, on ajoute un peu de la solution A, et ainsi de suite, en ayant soin de ne pas dépasser la proportion de une partie de A pour trois de B, ce qui est facile, en employant pour verser la solution A un verre gradué.

Pour les solutions A et B, à défaut d'eau distillée, on pourra employer l'eau de pluie. Il est bon d'ajouter à la solution B quelques gouttes d'un acide, l'acide sulfurique de préférence, et d'exposer le flacon aux rayons du soleil. Si par hasard la solution, qui doit être d'un beau vert clair transparent, se fonçait, on lui rendrait sa couleur et ses propriétés primitives en l'exposant aux rayons solaires après y avoir ajouté quelques gouttes d'acide sulfurique.

Le développement à l'hydroquinone est l'un des plus employés. Le bain révélateur se fait en dissolvant dans un litre d'eau chaude les substances suivantes :

| | |
|---|---|
| Sulfite de soude pur . . . . . . . | 75 grammes |
| Carbonate de soude. . . . . . . . . | 150 » |
| Hydroquinone . . . . . . . . . . . . | 10 » |

Ce bain ne doit jamais être employé tel quel, car son action serait trop forte. Il doit être, sous peine de voiler les plaques, mélangé de *bain vieux*, c'est-à-dire de révélateur ayant servi. On peut aussi affaiblir le *bain neuf*, soit en y mettant une ou deux plaques sacrifiées par avance, soit en l'additionnant d'une ou deux gouttes de la solution suivante :

| | |
|---|---|
| Eau . . . . . . . . . . . . . . . . . | 1000$^{cc}$ (1 litre) |
| Bromure de potassium . . . . | 100 grammes |

Quand on emploie le mélange de bain vieux et de bain neuf, le mieux est de les associer par parties égales, et d'ajouter du bain neuf si l'image tarde trop à apparaître, du bain vieux si elle vient trop vite. Cependant, pour les clichés instantanés, on mettra trois quarts de bain neuf pour un quart de bain vieux.

Quand l'image commence à venir. la sensibilité de la plaque diminue, et on peut la regarder de temps en temps, pendant quelques secondes, à la lumière d'un verre jaune. Il faudrait, en effet, de six à dix minutes à cette lumière pour qu'elle pût altérer le phototype.

On sortira définitivement la plaque du bain de développement quand les détails commenceront à paraître dans les ombres du sujet, c'est-à-dire dans les parties blanches du cliché, examinées par intervalles dans les conditions d'éclairage que nous avons indiquées tout à l'heure.

Le pyrogallol est, comme l'hydroquinone, un corps dérivé de la benzine. Pour développer au pyrogallol, on prépare par avance des solutions saturées de sulfite de sodium. On verse dans la cuvette :

| | |
|---|---|
| Eau. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 100 |
| Solution saturée de sulfite . . . . . | 10 |

on y plonge la plaque durant quelques secondes, puis on fait passer le mélange dans un verre à bec pour y ajouter :

| | |
|---|---|
| Pyrogallol. . . . . . . . . . . . | 1 cuillerée à moutarde. |
| Solution saturée de carbonate de soude. . . . . . . . . . . | 1 centimètre cube. |

On reverse le liquide dans la cuvette, après avoir bien remué, on y introduit à nouveau la plaque, et l'on attend la venue de l'image. Si le dessin tarde à paraître, c'est que le développement dont on se sert ne convient pas au temps de pose. On remettra donc le bain révélateur dans le verre pour y ajouter un centimètre cube de la solution de carbonate de potasse, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le phototype paraisse satisfaisant. S'il manque d'intensité, tout en reproduisant assez bien les détails, c'est du pyrogallol qu'il faudrait mélanger au bain. D'une manière générale, l'addition d'alcali, c'est-à-dire de la solution de carbonate, pousse aux détails, tandis que l'addition de réducteur, c'est-à-dire de pyrogallol, donne de l'intensité.

Le développement au pyrogallol est un des plus élastiques ; aussi est-il très apprécié des photographes de profession. Les amateurs l'emploient moins, parce qu'il tache les mains ; mais c'est à tort qu'ils le délaissent, car il suffit pour faire disparaître les taches de se tremper les doigts dans de l'eau acidulée avec un acide qui sera, de préférence, de l'acide citrique.

Une fois développé par l'un quelconque des trois procédés qui viennent d'être indiqués, la plaque est lavée, soit sous un robinet, soit dans une autre cuvette.

Ce premier lavage n'a pas besoin d'être long, il est immédiatement suivi du fixage qui se fait en plongeant la plaque dans une cuvette réservée exclusi-

vement à cette opération et contenant une solution d'hyposulfite de soude à 15 °/ₒ. La plaque doit rester dans ce bain jusqu'à disparition complète de la teinte blanchâtre qu'on observe à l'envers du phototype. Ce fixage dure de cinq à dix minutes. On peut pendant sa durée développer une autre plaque, mais il faudra avoir soin de s'essuyer les mains afin de ne pas introduire dans le développement, ni sur les plaques non révélées, la moindre trace d'hyposulfite de soude.

La plaque, fixée, peut désormais être conservée au grand jour. Elle doit être lavée, à fond cette fois, pour faire disparaître toute trace d'hyposulfite de soude. Ce lavage se fait soit à l'eau courante, soit dans une cuvette remplie d'eau qu'on renouvelle plusieurs fois. Il existe (fig. 74) des cuves à lavage très commodes dont les rainures peuvent se retirer et servir d'égouttoirs.

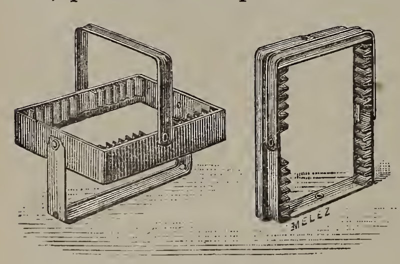


Fig. 74.

Avant d'être séchés, il est bon que les phototypes soient éclaircis en les passant quelques minutes dans un bain d'alun ainsi composé :

| | |
|---|---|
| Eau. . . . . . . . . . . . . | 1000<sup>cm</sup> cubes. |
| Alun de chrome . . . . . | 50 grammes. |

Ce bain, qui n'est pas indispensable, durcit la

gélatine et la rend plus inaltérable. Les phototypes doivent y rester dix à quinze minutes.

Le séchage se fera ensuite à une douce température. Les égouttoirs (fig. 74) sont très commodes pour cette opération. Il faut bien se garder, comme on pourrait être tenté de le faire, de sécher les phototypes en plein soleil ou devant le feu. En opérant ainsi, la gélatine fondrait et coulerait, et il ne resterait plus que le verre.

## VII

### Action des diverses couleurs sur les plaques photographiques.

L'appareil photographique permet d'obtenir des copies d'un objet ; mais, pour que ces copies soient fidèles, il faut prendre quelques précautions. Non seulement il faut placer son appareil dans des conditions déterminées, n'employer que certains objectifs pour éviter les erreurs de perspective, mais il y a de plus à tenir compte de ce que, dans la reproduction des couleurs, la photographie ordinaire n'observe pas la gradation de teintes que l'œil perçoit. C'est ainsi que le rouge n'influe que très peu sur la plaque, et bien que présentant à l'œil un éclat assez considérable, vient en noir sur les images

positives ; il en est de même du jaune de chrome, couleur très claire. Au contraire des couleurs foncées comme le bleu d'outremer, impressionnent beaucoup la plaque et viennent en noir sur le négatif, en clair sur le positif.

Si l'on forme, dans la chambre noire, l'image du spectre solaire sur une plaqne au gélatino-bromure d'argent et qu'on pose une seconde, par exemple, on voit, en comparant l'image obtenue au spectre solaire ou à une reproduction en couleur de ce spectre, que le spectre photographié s'étend dans la région située au delà du violet, beaucoup plus loin que le spectre visible, et que, du côté opposé, il s'arrête vers le vert. Les radiations jaunes, orangées et rouges n'ont donc exercé aucune action sur la plaque qui présente ainsi, pour les diverses couleurs, une sensibilité très différente de celle de notre œil ; le jaune et le vert qui impressionnent le plus cet organe semblent n'avoir aucune action sur l'émulsion photographique, fortement impressionnée, au contraire, par des radiations qui nous sont invisibles.

On en conclut pendant longtemps que seules les radiations bleues, violettes et ultra-violettes, sont susceptibles de produire des actions chimiques ; cependant, dès 1842, Herschell avait observé que certaines couleurs végétales sont très fortement altérées, non par ces radiations, dites alors chimiques,

mais par celles dont la couleur est complémentaire de la leur.

Ce fut Draper, en 1850, qui, en étudiant l'action de la lumière sur les plantes, montra le premier que toutes les radiations pourraient produire des actions chimiques. On sait qu'à la lumière, la matière verte des végétaux, la chlorophylle, décompose l'acide carbonique de l'air en dégageant de l'oxygène. Au lieu d'examiner l'action de la lumière blanche, Draper mit des plantes vertes sous une série de tubes de verre blanc contenant de l'eau saturée d'acide carbonique et fit arriver sur chacun de ces tubes, placés dans une chambre obscure, une seule des radiations composant le spectre solaire. En mesurant alors les volumes d'oxygène recueillis dans chacun des tubes, Draper trouva les nombres suivants pour chaque région du spectre :

| | |
|---|---|
| Rayons obscurs . . . . . . . . | $0^{cc}$,00 |
| Rouge et Orangé . . . . . . . | $20^{cc}$,33 |
| Jaune et Vert. . . . . . . . . . | $36^{cc}$,02 |
| Vert et Bleu. . . . . . . . . . | $0^{cc}$,10 |
| Bleu . . . . . . . . . . . . . . | $0^{cc}$,00 |
| Violet . . . . . . . . . . . . . | $0^{cc}$,00 |

Comme on le voit, les radiations bleues et violettes n'ont ici aucune action, et les autres agissent inégalement.

Or, nous avons vu que la chlorophylle absor-

bait précisément une partie des radiations rouges, jaunes et vertes. Son spectre d'absorption (fig. 75) présente cinq bandes absolument noires ; deux dans le rouge, une dans le jaune vert, une dans le vert et une à partir du bleu. La conclusion, dégagée par Draper de cette expérience, c'est que, seules, les radiations absorbées par un corps peuvent agir chimiquement sur lui.

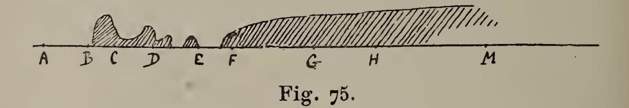



Fig. 75.

Cette loi a été vérifiée sur le bromure, l'iodure et le chlorure d'argent par beaucoup d'expérimentateurs parmi lesquels il faut citer surtout le Dr H. Vogel, de Berlin (1). Pour comparer les actions respectives du spectre solaire sur l'œil et sur la plaque photographique, le Dr Vogel projette sur l'émulsion le spectre solaire produit par une fente cunéiforme, dont la largeur varie de 0 à 2 millimètres, en sorte que le spectre, très lumineux sur un bord, va en s'obscurcissant progressivement jusqu'à l'autre. Les raies, bien visibles sur la partie lumineuse, se fondent vers la partie obscure, et s'étendent d'autant plus vers

(1) Voir : Prof. Dr H. Vogel. — La photographie des objets colorés avec leurs valeurs réelles — traduit de l'allemand par Henry Gauthier-Villars. Paris, Gauthier-Villars, éditeur, 1887.

cette région que la préparation est plus sensible pour les radiations voisines de chaque verre. On obtient ainsi les courbes comparatives de la figure 76.

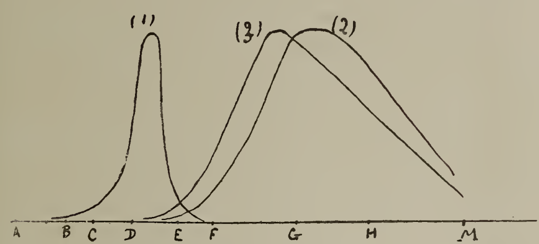



Fig. 76. — La courbe (1) montre l'action des diverses régions du spectre sur l'œil ; (2) sur une plaque au collodion ; (3) sur une plaque au gélatino-bromure d'argent.

Les radiations qui semblent n'impressionner aucunement la plaque sensible agissent en augmentant le temps de pose ; en outre, elles peuvent dans certains cas *continuer* l'action commencée par les radiations actives. Par exemple, un papier au chlorure d'argent, exposé préalablement pendant un temps très court au soleil, est impressionné même par les radiations rouges. En partant de ce fait, Becquerel a pu nommer ces dernières radiations *rayons continuateurs* par opposition aux rayons chimiques, qualifiés *rayons excitateurs*.

Les radiations rouges exercent fréquemment une action opposée à celle des radiations bleues et violettes ; c'est ainsi qu'en présence de l'air elles facilitent l'oxydation des sels ferreux provenant de

sels ferriques réduits sous l'action des radiations bleues ou violettes ; c'est ainsi encore que la résine de gaïac, bleuie par suite d'une oxydation sous l'influence des radiations bleues, est décolorée et ramenée au blanc, par la réduction qui s'opère sous l'action des radiations rouges.

*Sensibilisateurs chimiques et Sensibilisateurs optiques.* — L'addition de certaines substances dites accélératrices, telles que le nitrate d'argent, le tannin, le pyrogallol, l'ammoniaque, etc., augmente la sensibilité générale des plaques aux diverses radiations. Vogel a montré que ce phénomène était dû à ce que ces substances se combinent chimiquement avec l'iode, le brome, le chlore... du sel d'argent mis en liberté par l'action de la lumière ; c'est pourquoi on a donné à ces substances le nom de *sensibilisateurs chimiques*.

Le D[r] Vogel a fait voir également qu'il n'était pas indispensable que ce fût la préparation sensible elle-même qui absorbât les radiations capables d'agir chimiquement sur elle par le seul fait de leur absorption. D'une manière générale, une plaque photographique insensible à l'action de certaines radiations, s'impressionnera sous l'influence de ces mêmes radiations, si elle est imprégnée d'une substance capable de les absorber.

Pour provoquer une réaction chimique, l'énergie lumineuse doit donc, tout d'abord, disparaître en tant

que lumière ; cette condition, nécessaire, ne serait pas suffisante. A titre d'exemple, le tournesol qui absorbe les radiations rouges est incapable d'augmenter la sensibilité au rouge du gélatino-bromure.

Il faut que non seulement la substance ajoutée au sel sensible agisse sur la lumière par son pouvoir absorbant, joue le rôle de *sensibilisateur optique* comme on dit, mais encore qu'elle soit capable d'absorber l'iode, le brome ou le chlore mis en liberté, qu'elle remplisse, en un mot, l'emploi de *sensibilisateur chimique*.

C'est ainsi qu'en 1873, Vogel put faire, dans la 9me année de la Photogr. Mittheilungen, la déclaration suivante (1) :

« *Grâce à ces expériences, je me crois autorisé à dire avec une certaine assurance : nous sommes à même de rendre le bromure d'argent sensible à l'action de n'importe quelle couleur, ou d'augmenter la sensibilité qu'il possède déjà à l'égard de certaines couleurs* ; *il suffit de l'additionner d'une matière qui favorise la décomposition du bromure d'argent et qui absorbe la couleur en question, sans agir sur les autres.* »

La chlorophylle figure parmi les produits capables de jouer ce double rôle. Les substances susceptibles d'être des sensibilisateurs optiques sont principalement les matières colorantes, leur couleur étant précisément due à la propriété qu'elles possèdent d'absorber certaines radiations. Pour en essayer une, on produit son spectre d'absorption, et il y a espoir qu'elle joue le rôle de sensibilisateur optique pour les radiations correspondant aux bandes obscures qu'on y observe.

(1) Voir Vogel, ouvrage cité plus haut.

La fig. 77 indique, en hachures, les bandes d'absorption de quelques substances qui réussissent; les traits pleins représentent la sensibilité des plaques modifiées par elles (1).

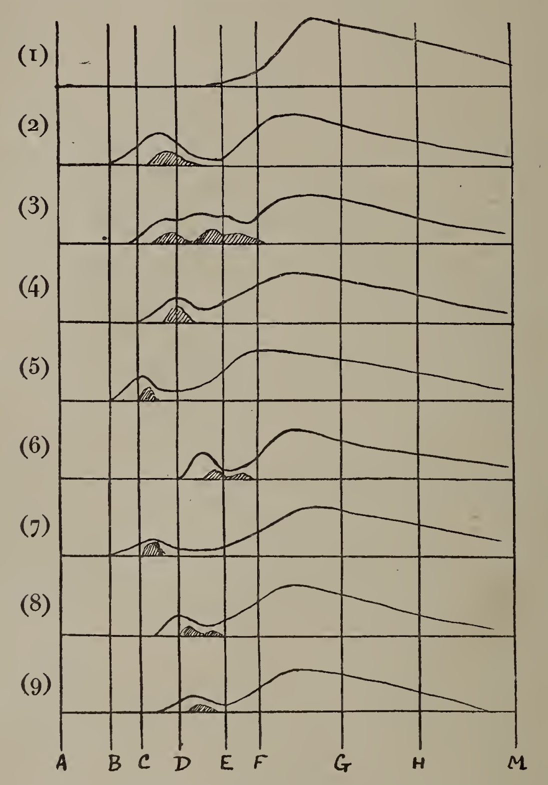



Fig. 77. — Gélatino bromure seul (1); gélatino-bromure additionné de cyanine (2); araline (3); violet de méthyle (4); vert malachite (5); éosine (6); vert à l'iode (7); rouge de naphtaline (8); fuschine (9).

(1) Cette figure est empruntée à l'ouvrage de Calmette : Lumière, Couleur et Photographie.

Comme on le voit, le maximum d'action ne correspond pas au maximum d'absorption. Il importe grandement de ne jamais dépasser la dose, toujours très faible, qui donne la sensibilité maxima, car si l'addition de matière colorante augmente la sensibilité de la plaque pour certaines radiations, elle l'affaiblit pour d'autres.

L'action varie d'ailleurs avec la nature du substratum et celle du sel d'argent. La fuschine, qui rend le bromure d'argent très sensible au jaune, augmente dans une proportion bien moindre l'impressionnabilité du chlorure ; le rouge de naphtaline agit également sur les deux ; l'éosine agit mieux sur le collodio-bromure, dont elle peut doubler la sensibilité au jaune, que sur le gélatino-bromure.

L'action des produits sensibilisateurs va en diminuant avec le temps : une plaque fraîchement préparée est meilleure qu'une vieille.

L'addition de substances accélératrices (sensibilisateurs chimiques proprement dits, azotate d'argent, ammoniac), exalte l'impressionnabilité des émulsions déjà additionnées de matières colorantes (sensibilisateurs optiques), aussi bien que celle des plaques ordinaires.

En additionnant de certaines matières les émulsions ordinaires on a pu préparer des plaques sensibles à des radiations déterminées ; Vogel a même obtenu, en colorant avec du rouge de naphtaline une pellicule au chlorure d'argent, une

plaque photographique de sensibilité colorée s'écartant peu de celle de l'œil, c'est-à-dire maxima pour le jaune, moins forte pour le vert jaune et l'orangé, faible pour le bleu et le rouge.

De telles plaques, dont la sensibilité est différente de celles des plaques ordinaires, sont dites plaques orthochromatiques ou isochromatiques.

*Emploi des écrans colorés.* — Nous avons vu que les sels d'argent subissaient, en réalité, l'action même des radiations autres que celles dites chimiques. Cette action est très lente; pour la rendre manifeste, il faut donc augmenter considérablement le temps de pose. L'expérience suivante, due à Vogel, rend bien compte du phénomène. Soit à photographier une bande bleue sur fond jaune. Si l'on opère dans les conditions ordinaires, on obtient comme image positive une bande blanche sur un fond noir. Mais si, au contraire, on a soin d'interposer devant l'objectif un disque de verre jaune pour arrêter les radiations bleues tout en laissant passer les jaunes sans les affaiblir, le positif obtenu présente, quand l'exposition a été suffisamment prolongée, une bande foncée sur un fond clair.

En 1889, M. Lippmann, dans une très intéressante communication à l'Académie des Sciences, a généralisé cet emploi des écrans colorés. Au lieu d'un seul écran, on en interpose successivement trois qui jouent le rôle du disque de verre jaune dans l'ex-

périence de Vogel. Sans ces écrans, les radiations bleues, très actiniques, impressionneraient trop fortement l'émulsion et voileraient l'image pendant le temps de pose qu'il est nécessaire de laisser à l'action beaucoup plus lente des radiations vertes, jaunes ou rouges.

Malgré tous les efforts tentés pour réaliser des plaques isochromatiques d'une sensibilité colorée semblable à celle de la rétine, on n'a pas encore pu résoudre le problème. Néanmoins, par un usage systématique et rationnel d'écrans colorés, on arrive, comme l'a montré M. Lippmann, à obtenir des images à valeurs justes. Nous citons textuellement une partie de la communication du savant professeur, communication que beaucoup trop de photographes ignorent encore :

« Devant l'objectif, je place une glace bleue et je » fais poser le peu de temps nécessaire pour que les » rayons bleus de l'image impressionnent la plaque. » Ensuite, sans toucher d'ailleurs à l'appareil, et en » ayant soin de ne pas le déplacer, je substitue à » la glace bleue une glace verte et je continue la » pose pendant un temps suffisant pour que le vert, » à son tour, impressionne la plaque fortement. La » glace verte a été choisie avec le plus grand soin, » de façon *qu'elle ne laisse pas passer la moindre* » *trace de bleu.* Dans ces conditions, on peut donner » aux rayons verts le temps de pose qui leur est

» nécessaire, sans avoir à craindre que le bleu, » cette fois totalement éliminé, vienne perdre l'épreuve » par son action indûment prolongée. Enfin, c'est au » tour des rayons rouges : on les fait agir en subs- » tituant devant l'objectif une glace rouge à la glace » verte. Cette glace rouge doit être choisie avec soin, » de *manière à ne pas laisser la moindre trace de* » *rayons verts ou bleus.*

» Le résultat final de cette triple pose est de » donner des photographies claires, sans taches » brunes, et dans lesquelles les feuillages verts, les » draperies jaunes ou rouges, etc., au lieu de donner » des nuances brunes, sont rendues par un dessin » finement modelé comme dans une gravure bien » faite ».

## VIII

### Préparation, Emploi et Traitement des plaques orthochromatiques.

*Préparation.* — Le nombre des matières colorantes capables de modifier la sensibilité des plaques aux couleurs est très grand ; cependant il n'y en a que quelques-unes de bien connues et d'utilisées en pratique. On peut employer simultanément plusieurs matières colorantes dont les spectres d'absorption, et par suite les sensibilités, sont différents ; leurs

effets s'ajoutent, ce qui permet d'obtenir un *ortho-chromatisme plus complet* (1). C'est ainsi que le mélange de bleu et de rouge de quinoline a permis à Vogel, qui a désigné ce mélange sous le nom d'azaline, d'obtenir des plaques dont la sensibilité au vert et au rouge était sensiblement augmentée.

Les matières les plus employées sont des dérivés de la fluorescéine ou éosines, et principalement l'éosine jaune ordinaire et l'érythrosine ; on emploie aussi d'autres éosines telles que la rose Bengale, la cyanosine, l'érythrine, etc.

Si l'on craint que ces produits, en vente dans le commerce, soient impurs, on les purifie en les dissolvant dans l'eau, les précipitant par un acide, les lavant, les redissolvant enfin dans un alcali pour les précipiter à nouveau par une solution de sel marin.

Le bleu de quinoline (ou cyanine) augmente la sensibilité pour l'orangé, surtout par la région voisine de la raie D ; il diminue par contre la sensibilité pour le bleu, plus avec les plaques à la gélatine qu'avec celles au collodion.

Le rouge de quinoline exalte la sensibilité au vert et au jaune.

(1) Toutes les matières colorantes ne peuvent être indifféremment mélangées ; d'après Eder les mélanges préférables sont ceux de deux matières colorantes dont le maximum d'action de l'une répond au minimum de l'autre.

L'éosine et les matières colorantes à l'éosine sont de bons sensibilisateurs pour le vert, le vert jaune et éventuellement pour le jaune (Eder).

Le violet de méthyle excite la sensibilité pour le jaune et pour l'orangé.

Les matières colorantes vertes ont le défaut de sensibiliser aussi pour le bleu, le violet et l'ultra-violet ; le vert à l'iode, d'après Eder, est celui qui donnerait la plus grande sensibilité pour le rouge extrême.

Parmi les matières colorantes rouges, la fuschine qui rend sensible pour le vert jaune, ne donne qu'un faible résultat.

L'acétate de rosaniline et le rouge de toluol de Coupier assurent au contraire des effets satisfaisants, entre les raies E et D.

La chrysaniline augmente notablement la sensibilité pour le bleu d'outremer et le vert clair, mais nullement pour le jaune.

Le tableau ci-contre, extrait de l'ouvrage de Calmette, résume les effets d'un certain nombre de matières colorantes.

| MATIÈRES COLORANTES | RADIATIONS DONT ELLES AUGMENTENT L'ACTION | OBSERVATIONS |
|---|---|---|
| Cyanine .......... | Orangé et rouge ....... | (Augmente aussi l'action du bleu). |
| Céruléine.......... | Orangé et rouge. | |
| Phyllocyanine ..... | Tout le spectre jusqu'en A | |
| Vert malachite..... | Orangé et rouge . ..... | (Augmente aussi l'action du bleu, du violet et de l'ultra-violet). |
| Vert à l'iode....... | Jaune, orangé, rouge. | |
| Bleu Coupier ...... | Jaune et orangé. | |
| Éosine............ | Vert et jaune .......... | (Diminue l'action du bleu). |
| Érythrosine ....... | — | — |
| Rose bengale ...... | — | — |
| Fuschine.......... | — | — |
| Rouge de toluène... | — | — |
| Rouge de naphtaline | — | — |
| Chrysaniline....... | Vert ........ ......... | (Diminue beaucoup l'action du bleu, du violet et de l'ultra-violet). |
| Chrysoïdine ....... | — | — |

On trouve dans le commerce des plaques isochromatiques toutes préparées : le premier brevet fut pris par Clayton et Attout-Tailfer, qui employèrent l'éosine, mais qui n'indiquèrent, dans leur brevet, aucune formule précise de combinaison. Les frères Lumière, de Lyon, fabriquent aussi d'excellentes plaques isochromatiques ; il y en a de deux sortes, les unes étant surtout sensibles au rouge, les autres au jaune et au vert ; la maison Perron, de Mâcon, livre également de bonnes plaques isochromatiques.

Le procédé employé pour préparer de semblables plaques consiste simplement à ajouter la matière

colorante à l'émulsion. Les plaques obtenues ont l'avantage de se conserver assez longtemps.

Il est facile au reste d'orthochromatiser soi-même des plaques ordinaires en employant le *procédé au bain*. Il faut, autant que possible, que les plaques ne renferment pas d'iodures. On les plonge dans de l'eau distillée, puis on les immerge une ou deux minutes, dans un bain convenable, généralement une solution alcoolique étendue de la matière colorante, on les égoutte et on les met à sécher dans une étuve telle que celle de la fig. 78.

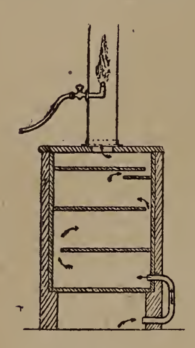


Fig. 78.

Ces plaques ne se conservent pas aussi longtemps que celles du commerce; au bout de quelques jours, d'une ou deux semaines au plus, elles perdent et leur sensibilité spéciale et leur sensibilité générale : les sels d'argent se décomposent à la longue et la plaque noircit. Si elle ne noircit pas, on n'en trouve pas moins au développement des taches noires qui, commençant aux bords, gagnent peu à peu toute la plaque. Par contre, ces mêmes plaques ainsi préparées par immersion, sont un peu plus rapides que les plaques isochromatiques du commerce, bien que, par rapport aux plaques ordinaires, leur sensibilité générale soit un peu affaiblie.

Citons quelques formules, indiquées par Vogel.

La suivante :

| | |
|---|---|
| Eau distillée | 100 |
| Solution d'éosine à 1/1000 | 25 |
| Ammoniaque | 1 |

accroît la sensibilité pour le vert, le jaune vert et le jaune.

Résultats analogues avec l'une des deux solutions :

| | | |
|---|---|---|
| I | Eau | 175 |
| | Solution d'érythrosine à 1/1000 | 25 |
| | Ammoniaque | 4 |
| II | Eau | 70 |
| | Solution d'érythrosine au 1/1000 | 10 |
| | Ammoniaque | 12 |
| | Alcool ordinaire à 90° | 30 |

On augmente la sensibilité aux radiations peu réfrangibles en plongeant une plaque ordinaire, d'abord dans l'eau distillée, puis dans la solution :

| | |
|---|---|
| Eau | 1 000 |
| Azotate d'argent | 1 |

et en arrosant trois fois avec la solution :

| | |
|---|---|
| Eau | 1 000 |
| Erythrosime au 1/1000 | 25 |
| Azaline au 1/500 | 2 |
| Carbonate d'ammonium au 1/6 | 50 |

La formule II donne, grâce à l'alcool, un séchage plus rapide.

Le bain suivant exalte la sensibilité au jaune et au rouge :

| | | |
|---|---|---|
| Eau . . . . . . . . | 70 | } 100 |
| Alcool . . . . . . | 30 | |
| Ammoniaque . . . . . . . . . . . . . | | 1 |
| Solution alcoolique d'azaline . . . . | | 4 |

L'azaline s'obtient en mélangeant 1 de bleu de quinoline avec 10 de rouge de quinoline.

Mais, au bout de huit jours, la décomposition se produit. On obtient une conservation plus longue et une plus grande rapidité en employant le bain :

| | |
|---|---|
| Eau distillée . . . . . . . . . . | 50 à 100 |
| Erythrosine à 1/1000 . . . . . . . . . | 25 |
| Solution de nitrate d'argent à 1/1000. | 25 |

L'immersion doit être d'une minute. Cette formule donne de très bons résultats si le sujet permet de sacrifier un peu la sensibilité au rouge ; le nitrate d'argent, en effet, a l'avantage d'augmenter la sensibilité générale de la plaque tout en la diminuant pour les radiations bleues et violettes, ce qui permet souvent de se passer d'un écran compensateur.

*Emploi.* — L'intensité de la lumière colorée diffusée par un objet coloré monochrome n'est pas la même que celle de la même couleur considérée dans le spectre solaire, ainsi le jaune de chrome est bien plus faible que le jaune du spectre. Or, la sensibilité des plaques a été étudiée au moyen du spectre solaire. En outre, une plaque impression-

nable à toutes les radiations du spectre, c'est-à-dire donnant un cliché d'intensité uniforme du rouge au violet (abstraction faite des raies, bien entendu) ne rendrait pas du tout l'effet produit sur l'œil par le spectre. Le jaune solaire étant au moins huit fois plus intense que le bleu, la partie correspondante du cliché devrait paraître, ainsi, huit fois plus intense que celle correspondant au bleu. Si l'on admet que l'intensité, l'opacité d'un cliché est proportionnelle en chaque point à la quantité de lumière reçue, il faudrait pour obtenir ce résultat que la partie correspondante au jaune reçût une quantité de lumière huit fois plus grande que celle correspondant au bleu (1).

C'est pour toutes ces raisons qu'on emploie les écrans colorés ou écrans compensateurs, dont nous avons déjà parlé dans les chapitres précédents.

Ces écrans peuvent consister en petites plaques de verre très mince, coloré dans la masse, à faces bien parallèles, qu'on place à volonté devant ou derrière l'objectif, ou mieux entre les lentilles à la place du diaphragme.

On peut employer avantageusement le disque ou la réglette orthochromatiques de MM. Duplouich et Henry (fig. 79), qui permet une interposition facile et rapide de ces écrans.

(1) Voir : Calmette. Lumière, Couleur et Photographie.

On se sert aussi avec beaucoup de succès de cuves à faces parallèles contenant une dissolution :

D'*hélianthine rouge* transparente au rouge et au jaune ;

De *bichromate potassique* transparente au rouge et au vert ;

D'*acide picrique* transparent au jaune et au vert ; etc.

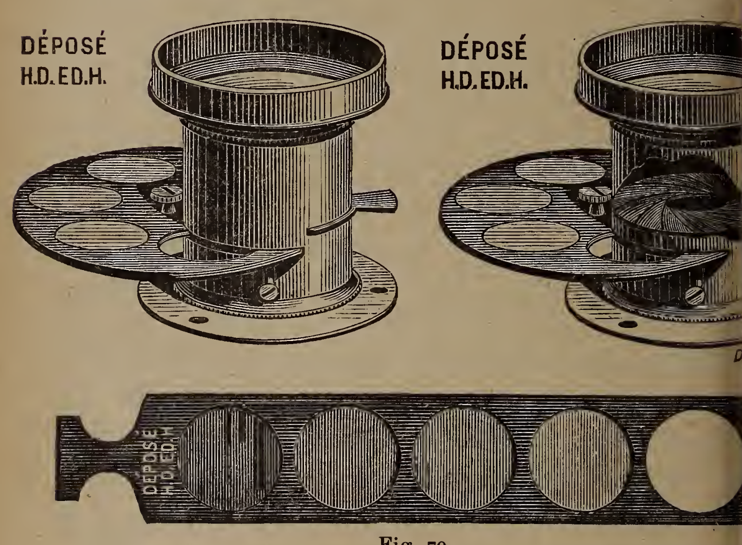



Fig. 79.

On peut enfin utiliser soit des plaques de gélatine colorées, soit des plaques de verre enduites de collodion coloré.

On préfère le plus souvent le collodion addi-

tionné de 1, 2, 3 millièmes d'aurantia dissoute dans l'alcool, ce qui donne des pellicules très transparentes pour le vert, le jaune et le rouge, mais qui finissent par pâlir à la lumière.

Il faut naturellement augmenter le temps de pose avec l'emploi de tels écrans, qui n'en sont pas moins réellement très avantageux.

Au lieu de tamiser la lumière par un écran comme ceux que nous venons de décrire, on peut faire varier l'éclairage de l'objet, soit en mettant un verre coloré devant la source lumineuse, artificielle, bien entendu, dont on se sert, soit en produisant des lumières de couleurs différentes. La nature de l'éclairage influe beaucoup: les lumières jaunes procurent avec les plaques isochromatiques des phototypes bien mieux venus que les lumières bleues. C'est ainsi que les lampes à huile et à gaz donnent de meilleurs résultats qu'avec les plaques ordinaires; les lampes électriques, le magnésium donneraient plutôt des résultats inférieurs.

Ces remarques ne s'appliquent guère qu'aux reproductions; pour les paysages, on pourra profiter des variations de l'éclairage solaire; c'est le matin surtout qu'on obtiendra les meilleurs effets isochromatiques.

L'emploi des plaques isochromatiques, combiné avec celui d'écrans compensateurs, est particulièrement tout indiqué quand il s'agit de reproduire des tableaux à l'huile ou à l'aquarelle, des tapis, des fleurs, etc.

Les plaques à l'azaline, avec un emploi rationnel des trois écrans, comme l'a conseillé M. Lippmann (voir la fin du chapitre précédent), donnent particulièrement de très beaux résultats. D'après Vogel, il faut mettre au point sans écran. Les temps de pose sont très variables selon l'objet et l'éclairage ; il semble cependant que les peintures à l'huile exigent à peu près une exposition double de celle requise pour les aquarelles.

La teinte brunâtre des photographies, teinte peu actinique, fait recommander, pour leur reproduction, l'emploi de plaques isochromatiques et d'un écran jaune, ce qui a en outre l'avantage d'atténuer le grain.

Les paysages sont bien rendus avec des plaques à la chlorophylle ou à l'azaline ; il en est de même des intérieurs.

Pour les portraits il faut employer des plaques de la plus grande sensibilité possible ; les plaques à l'érythrosine et à l'azotate d'argent rendront bien le blond des cheveux.

*Traitement.* — Les plaques isochromatiques se traitent comme les autres à la condition de prendre quelques précautions pour leur développement. On peut ne rien changer à l'éclairage rouge ou vert jaune du laboratoire, si l'on prend garde de masquer toute lumière lors de la mise au bain et de laisser la cuvette couverte pendant quelques secondes. Cepen-

dant il sera préférable de s'éclairer avec une lumière dont la couleur corresponde au minimum d'activité de la plaque employée ; ainsi pour les plaques sensibles au vert jaune, on prendra un verre rouge très foncé ou même un double verre rouge ; un verre vert sera employé pour les plaques sensibles au rouge. Quel que soit l'éclairage il devra être faible ; on aura même soin, comme nous venons de le dire, de plonger la plaque dans le bain révélateur en pleine obscurité, et de couvrir la cuvette pendant les premières minutes du développement.

Quant au bain de développement lui-même, c'est celui usité pour les plaques ordinaires. Il convient seulement de le préparer assez faible, car plus le développement est lent, meilleur est l'effet obtenu. Eder recommande de commencer par un bain d'oxalate ferreux ayant déjà servi, et de le remplacer au bout de 5 à 10 minutes par un bain neuf.

Cependant, le développement alcalin au pyrogallol semble approprié tout particulièrement aux plaques isochromatiques.

Il faut, en tout cas, pousser énergiquement le négatif, jusqu'à ce qu'il apparaisse un peu voilé par réflexion : le fixage l'éclaircira, et le léger voile observé demeure sans influence sur l'impression des positives. Le fixage se fait à l'hyposulfite, comme d'habitude. Il est bon, préalablement, une fois le négatif terminé, de passer ce négatif à l'alcool pour

lui enlever l'excès de matière colorante qui adhère encore à la gélatine (1).

Un volume entier serait nécessaire pour décrire la pratique complète de l'isochromatisme, avec les divers cas particuliers qui peuvent se présenter; nous nous sommes contentés de donner quelques généralités, renvoyant pour les détails à l'excellent Manuel pratique d'orthochromatisme de M. Léon Vidal, qui a beaucoup étudié ces intéressantes questions.

## IX

### Les procédés positifs

Photocopies sur papier albuminé, aristotype, collodion. — Diapositives sur verre. — Application des propriétés de la gélatine bichromatée.— Tirages photomécaniques.

Le phototype ou cliché terminé, il est rare qu'il n'offre pas quelque imperfection : la gélatine peut présenter des petits trous, etc. ; on procède alors à sa toilette, et ce n'est qu'après l'avoir retouché, maquillé au besoin, qu'on arrive au tirage des photocopies positives, appelées parfois épreuves positives.

Pour ce tirage, il suffit de mettre la préparation sensible contre le cliché et d'exposer le tout à la

(1) Voir *Soret*. Cours théorique et pratique de photographie. Paris, Société d'Editions scientifiques.

lumière, dans un châssis spécial, appelé châssis-presse ou châssis positif.

Le support le plus généralement employé pour les positifs est le papier et le sel sensible du chlorure d'argent.

On se sert de papier Rives et on met le chlorure d'argent soit dans la pâte du papier lui-même, soit dans de l'albumine, de la gélatine ou du collodion, soit dans un mélange de ces trois matières colloïdales.

Le plus simple est d'employer le papier salé qu'on prépare en mettant 4 à 5 minutes du papier Rives sur le bain :

| | |
|---|---|
| Eau | 1000 |
| Sel marin | 30 |

On le sèche, et on le fait ensuite flotter 2 ou 3 minutes sur le bain sensibilisateur :

| | |
|---|---|
| Eau | 1000 |
| Azotate d'argent | 10 |

Mais, plus généralement, on a recours au papier à l'arrow-rowt, gélatiné ou albuminé. Ce dernier s'obtient en battant de l'albumine en neige, y ajoutant 1 °/₀ de sel marin, l'abandonnant environ 15 jours en été, 30 en hiver jusqu'à ce qu'elle exhale une forte odeur animale, puis la versant lentement dans une cuvette en évitant l'introduction de bulles

d'air. On y fait alors surnager le papier quelques secondes, puis on le sèche en le suspendant avec des pinces.

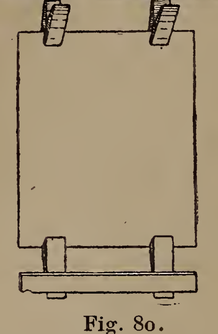


Fig. 80.

Pour le rembrunir on l'exposera sur la solution ci-après :

| | |
|---|---|
| Eau distillée . . . . . . . | 1000 |
| Azotate d'argent . . . . | 120 |
| Carbonate de sodium. . | 10 |

dans une pièce éclairée par de la lumière jaune. Une fois retiré on le laisse sécher comme précédemment. Le papier se retire en le faisant rouler sur un tube (fig. 81).

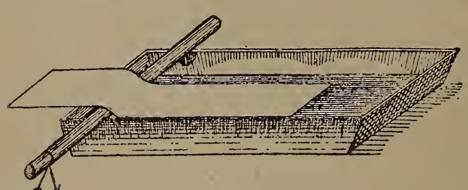


Fig. 81.

Il ne se conserve que deux ou trois jours ; on en trouve dans le commerce que l'on pourrait garder plus longtemps, mais il vaut mieux le préparer au moment de s'en servir. Depuis quelque temps on emploie beaucoup de papiers, dits

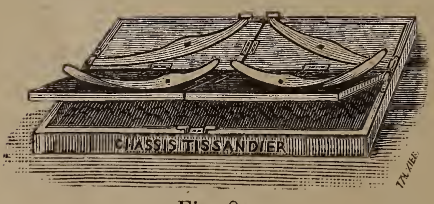



Fig. 82.

aristotypes, etc., obtenus en étendant sur du papier une émulsion de gélatino-chlorure ou de collodio-chlorure.

Ces papiers s'emploient comme l'albuminé.

Nous avons dit que le tirage des épreuves définitives se faisait au moyen du châssis positif (fig. 82). On y place le phototype négatif la face gélatinée en-dessus, puis le papier, en ayant soin que la surface sensible soit bien en contact avec le phototype. L'exposition ou insolation doit se faire de préférence à l'ombre, sauf pour les clichés durs, c'est-à-dire à grandes oppositions, qui demandent l'exposition au soleil. Pour les phototypes faibles, il est bon de couvrir le châssis avec un verre dépoli, une feuille de papier minéral ou un verre de couleur.

On surveille la venue de l'image en ouvrant un des côtés du châssis et en regardant l'épreuve. L'impression doit être en général arrêtée quand le ton a dépassé un peu l'intensité définitive à obtenir, et que les grands blancs commencent à se teinter.

La photocopie insolée pourrait être simplement fixée, en la plongeant dans un bain d'hyposulfite de sodium destiné à dissoudre les parties du sel d'argent non impressionnées par la lumière. Mais, outre que le ton de telles images est désagréable, elles ne se conserveraient pas. C'est pourquoi on procède, avant le fixage, au virage, opération dont le but est de remplacer la plus grande partie de

l'argent formant l'image par un métal moins altérable, l'or, le platine, etc., qui donne en outre un ton plus agréable.

Les épreuves à virer sont d'abord immergées dans une cuvette pleine d'eau qu'on renouvelle jusqu'à ce qu'elle soit bien claire et ait perdu la teinte laiteuse que lui communiquent d'abord les clichés. On les plonge ensuite dans un bain de virage, alcalin ou neutre, dont les formules suivantes offrent les deux types principaux :

| VIRAGE NEUTRE | | VIRAGE ALCALIN | |
|---|---|---|---|
| Eau distillée | 1.000 | Eau pure | 1.000 |
| Chlorure d'or | 1 | Carbonate de sodium | 0,4 à 2 |
| Craie lévigée | 5 | Chlorure d'or | 0,5 à 1 |

Les bains de virage gagneront à être maintenus à une température de 20° environ, et par suite, chauffés légèrement en hiver. Les épreuves doivent être constamment agitées afin d'assurer une action uniforme du mélange. A leur sortie, on les lavera soigneusement de nouveau, on les fixera dans la solution suivante :

| | |
|---|---|
| Eau | 1.000 |
| Hyposulfite de soude | 200 |

Enfin, après un dernier lavage qui ne doit pas durer moins de douze à vingt-quatre heures sous un robinet d'eau courante, on les séchera entre des feuilles de buvard blanc épais, et on les collera,

avec de la colle d'amidon, sur leur support définitif.

Si l'on tient à donner du brillant à l'épreuve, on peut l'encaustiquer; c'est, du reste, un moyen de la préserver de l'humidité. L'encaustique se prépare en dissolvant 25 à 30 grammes de cire vierge dans 150 à 200 centimètres cubes d'éther sulfurique ou de benzine. On se sert, pour l'étendre sur l'épreuve une fois séchée, d'un tampon de flanelle; avec un second tampon on enlève l'excès d'encaustique déposé.

Outre les sels d'argent, on a employé d'autres sels sensibles à la lumière, comme bases de papier, principalement les sels de platine et de fer, sur l'emploi desquels nous n'insisterons pas.

Au lieu de papier, on emploie parfois le verre comme support, principalement quand on désire avoir des photocopies transparentes (ou diapositives), destinées soit à la projection, soit à faire des vitraux. On peut alors étendre une émulsion de gélatino ou de collodio-chlorure sur le verre et tirer comme sur papier.

Mais on peut aussi se servir des mêmes plaques que pour les négatifs; on insole toujours au châssis-presse en ayant soin seulement d'opérer à une faible lumière, à la lumière d'une bougie par exemple, et seulement quelques secondes; on développe ensuite et l'on fixe comme pour les clichés, sauf qu'il faut se servir d'un révélateur dilué et développer lentement.

On fait enfin des papiers au gélatino-bromure, qui ne sont que du papier couché sur lequel on a étendu une émulsion de gélatino-bromure d'argent; on les traite par développement, commes les plaques.

Tous ces procédés semblent donner des épreuves peu stables, sauf peut-être les papiers aux sels de platine. Il n'en est pas de même des suivants, basés sur une propriété remarquable de la gélatine bichromatée, découverte par un savant français, Poitevin, en 1855, et qu'on peut formuler en ces termes :

« *La gélatine bichromatée, sous l'influence de la* » *lumière, s'insolubilise dans l'épaisseur de la couche,* » *et ceci proportionnellement à l'intensité de la* » *lumière qui l'a pénétrée.* »

L'une des applications les plus immédiates de cette propriété est le procédé au charbon, dont voici le principe :

Si l'on incorpore une poudre colorée dans de la gélatine bichromatée qu'on coule sur papier, les parties devenues insolubles, après insolation derrière un cliché, emprisonneront la matière colorante, et ceci proportionnellement à l'action de la lumière qui a traversé le négatif, tandis que les parties restées solubles seront éliminées par un dissolvant approprié.

On trouve dans le commerce de tel papier mixtionné. Pour le sensibiliser, on l'immerge quelques instants dans la solution suivante :

| | |
|---|---|
| Eau. . . . . . . . . . . . . . | 100 cent cubes. |
| Bichromate de potasse. . . | 2 à 6 grammes |

Une fois retiré du bain et séché, le papier, exposé à la lumière dans le châssis-presse, reproduit en positif l'image du négatif qui lui a été superposé dans le châssis. Quand on juge l'impression suffisante, on retire le papier, on le plonge, le côté mixtionné en dessus, dans une cuvette contenant de l'eau froide filtrée. Quand la feuille paraît complètement ramollie, on applique contre elle, face en dessous, une feuille de papier transport destinée à recevoir l'épreuve, puis on retire les deux feuilles qu'on soumet ensemble à une légère pression pour en assurer le contact intime. En les plongeant ensuite l'une et l'autre dans un bain d'eau chaude à 35° ou 45°, l'épreuve abandonne le papier mixtionné et adhère au transport qui est ensuite immergé successivement dans une cuvette d'eau froide et dans un bain d'alun à 2 °/₀.

L'épreuve ainsi obtenue est renversée. Pour avoir une image ordinaire, il faut faire un double transport. On trouvera tous les détails des manipulations à exécuter dans les ouvrages de MM. Aubert, Despaquis, Léon Vidal, etc.

La propriété dont nous venons de parler, et que la gélatine bichromatée partage avec d'autres substances colloïdales, l'albumine, la colle de poisson, etc., est beaucoup employée dans les phototirages mécaniques.

Le plus simple de tous est la photocollographie, appelée encore phototypie.

Ce procédé consiste à étendre sur un support, rigide ou souple, une couche de gélatine bichromatée, et à l'insoler derrière un négatif. Les parties correspondant aux régions claires du cliché s'insolubilisent proportionnellement à la lumière qui a traversé le négatif; éliminant le bichromate par un lavage, et mouillant au moyen d'un mélange d'eau et de glycérine, on obtient une véritable planche lithographique. En y passant un rouleau de gélatine chargé d'encre, l'encre d'imprimerie ne prend que sur les parties insolées et proportionnellement à leur degré d'insolation, tandis qu'elle est repoussée par les autres. On peut alors appliquer une feuille de papier couché et faire passer sous une presse analogue aux presses lithographiques.

En encrant à nouveau et en remettant une autre feuille de papier, on peut tirer ainsi un grand nombre d'exemplaires de l'image.

Au lieu d'imprimer sur une surface plane, on peut imprimer sur une surface creuse et produire soit une planche en creux que l'on tire comme la taille-douce, soit une planche en relief qu'on tire en typographie.

Dans les deux cas, on étend sur une plaque métallique bien plane, zinc ou cuivre, grainée auparavant, une légère couche de gélatine ou d'albu-

mine bichromatée, et on insole derrière un positif si l'on désire faire de la gravure en creux, derrière un négatif si l'on a l'intention de faire de la gravure en relief. On peut encore faire simplement un report de papier au charbon sur le métal.

On dépouille l'image comme d'habitude, par un lavage à l'eau tiède, puis on procède à la morsure au moyen de solutions de perchlorure de fer pour le cuivre, d'acide azotique pour le zinc. La morsure ne peut pénétrer les noirs de l'image représentés par les parties de la gélatine imperméabilisées par la lumière, et traverse au contraire les blancs formés de gélatine perméable. On obtient ainsi soit une planche photoglyptographique qu'on tire comme la taille-douce, soit un block phototypographique qu'on tire dans le texte comme des caractères d'imprimerie.

Dans le premier cas, on fait de la photoglyptographie appelée souvent photogravure en creux ou héliogravure.

Dans le second, on fait de la phototypographie ou photogravure en relief.

Mais, dans ce dernier cas, il ne suffit pas, comme dans le premier, de donner avec la résine à la planche de métal un grain qui ne serait plus assez régulier. On est obligé de recourir à un procédé très précis de grainage et d'interposer entre le phototype, entre le négatif original et la photocopie

destinée à former les réserves, un réseau, ou trame, c'est-à-dire une pellicule transparente, munie d'un quadrillage à traits noirs d'une très grande régularité, analogue à celui du papier Gillot. Tels sont les réseaux de la fig. 83, fabriqués par la maison Gaillard, de Berlin.

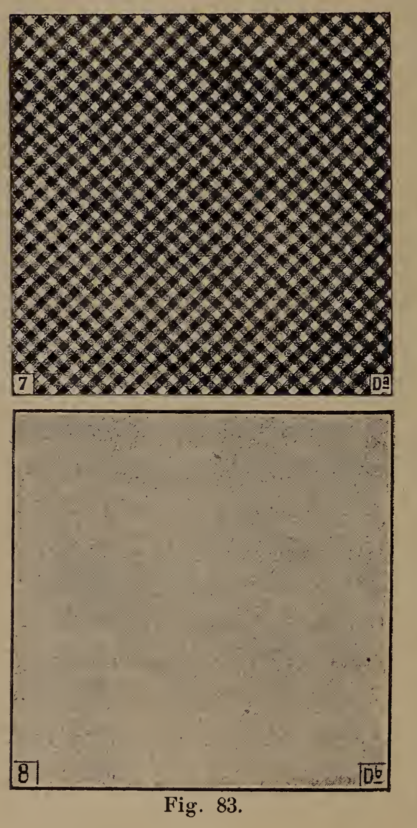


Fig. 83.

Souvent aussi, on se sert de papiers lignés, soit directement, soit indirectement en faisant des reproductions au collodion; la fig. 84 représente de telles linéatures sur papier, de la maison Ad. Turcke, de Munich.

Avant d'utiliser pour ces tirages photomécaniques les propriétés de la gélatine, on s'est servi beaucoup du bitume de Judée pour obtenir directement

la planche. Il reçoit encore fréquemment cette application aujourd'hui. On recouvre de bitume une feuille de zinc, on insole derrière un négatif, on dépouille l'image de l'excès de substance sensible, et on effectue des morsures à l'eau acidulée.

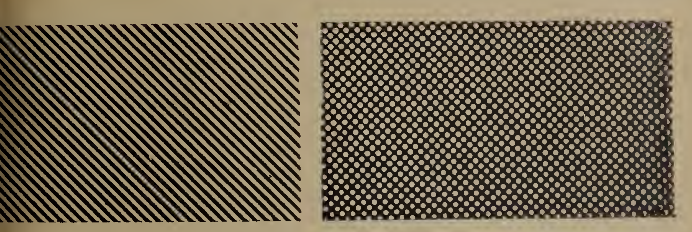


Fig. 84.

Ce procédé, dû à Niepce de St-Victor, est un de ceux qu'on emploie le plus souvent maintenant. Il a remplacé la gravure sur bois dans l'obtention de la plupart des clichés des figures qui illustrent les ouvrages actuellement publiés.

# QUATRIÈME PARTIE

---

## La Chromophotographie

OU

## Reproduction directe des Couleurs

QUATRIÈME PARTIE

# La Chromophotographie
ou
# Reproduction directe des Couleurs

## I

### Historique. — Recherches d'Edm. Becquerel.

Découvertes antérieures à Daguerre. — Prévisions de Tiphaine de la Roche. — Expériences de Becquerel.

En 1760, c'est-à-dire bien avant la découverte de Daguerre, un rêveur, Tiphaine de la Roche, Normand et grand amateur d'excentricités, publiait sous le titre de *Tiphantie*, anagramme de son nom, un curieux petit ouvrage où il devina la photographie et même la photographie des couleurs, comme on va en juger :

Tiphaine se suppose transporté dans le palais des Génies élémentaires, dont le chef lui dit :

« Tu sais que les rayons de la lumière réfléchis des » différents corps font tableau et peignent ces corps sur

» toutes les surfaces polies, sur la rétine de l'œil, par
» exemple, sur l'eau, sur les glaces. Les esprits élémen-
» taires ont cherché à fixer ces images passagères, ils ont
» composé une matière très subtile, très visqueuse et très
» prompte à se dessécher et à se durcir, au moyen de
» laquelle un tableau est fait en un clin d'œil. Ils en
» enduisent une pièce de toile et la présentent aux objets
» qu'ils veulent peindre : le premier effet de la toile est
» celui du miroir ; on y voit tous les corps voisins et
» éloignés dont la lumière peut apporter l'image.

» Mais ce qu'une glace ne saurait faire, la toile, au
» moyen de son enduit visqueux, retient les simulacres.
» Le miroir vous rend fidèlement les objets, mais n'en
» garde aucun ; nos toiles ne les rendent pas moins fidè-
» lement, mais les gardent tous. Cette impression des
» images est l'affaire du premier instant où la toile les
» reçoit. On l'ôte sur-le-champ, on la place dans un
» endroit obscur ; une heure après, l'enduit est desséché
» et vous avez un tableau d'autant plus précieux qu'aucun
» art ne peut en imiter la vérité et que le temps ne peut,
» en aucune manière, l'endommager. Nous prenons dans
» leur source la plus pure, dans le corps de la lumière,
» les couleurs que les peintres tirent de différents maté-
» riaux que le temps ne manque jamais d'altérer. La
» précision du dessin, la variété de l'impression, les tou-
» ches plus ou moins fortes, la gradation des nuances,
» les restes de la perspective, nous abandonnons tout cela
» à la nature, qui, avec cette marche sûre qui jamais
» ne se démentit, trace sur nos toiles des images qui
» en imposent aux yeux et font douter à la raison si ce
» qu'on appelle réalités ce ne sont pas d'autres fantômes
» qui en imposent aux yeux, à l'ouïe, au toucher, à tous
» les sens à la fois.

» L'esprit élémentaire entra ensuite dans quelques
» détails physiques : premièrement sur la nature du corps
» gluant qui intercepte et garde les rayons ; secondement
» sur les difficultés de le préparer et de l'employer ; troi-
» sièmement sur le jeu de la lumière et de ce corps
» desséché ; trois problèmes que je propose aux physi-
» ciens de nos jours et que j'abandonne à leur sagacité. »

Les recherches effectives entreprises sur ce sujet sont bien antérieures à la découverte de Daguerre, mais les solutions données tant par les inventeurs qui l'ont précédé que par ceux qui l'ont suivi jusqu'à M. Lippmann sont toutes incomplètes et ne remplissent pas les conditions indispensables à une bonne reproduction des couleurs.

Avant d'arriver à l'élégante méthode suivie par le célèbre professeur de la Sorbonne, méthode qui résout le problème d'une façon absolue (au moins en théorie), nous croyons utile de rappeler brièvement les principales expériences de ses prédécesseurs sur ce sujet.

D'après un ouvrage célèbre de Gœthe sur les couleurs, ce serait Seebeck, professeur de physique à l'Université d'Iéna, connu surtout pour sa découverte des courants thermo-électriques, qui, le premier, en 1810, aurait cherché à obtenir des photographies colorées naturellement par la lumière.

On sait qu'en faisant passer au travers d'un prisme un rayon de lumière blanche, et en le recevant à sa sortie sur un écran convenablement disposé, on obtient une image vivement colorée, et présentant dans un ordre constant une série de teintes qui se fondent les unes dans les autres en formant ce qu'on appelle en physique un *spectre*. Parmi ces teintes qui, en réalité, sont en nombre infini, on distingue principalement les sept suivantes

dont l'énumération forme un alexandrin bien connu.

Violet, Indigo, Bleu, Vert, Jaune, Orangé, Rouge.

Seebeck fit tomber sur du chlorure d'argent étendu sur du papier un spectre obtenu comme nous l'avons dit et constata les résultats suivants :

La matière employée prenait dans le violet une teinte brun rougeâtre; dans le bleu, elle se colorait en bleu; le vert lui communiquait une teinte bleuâtre; le jaune la laissait intacte; et, enfin, le rouge et l'infra-rouge la teignaient respectivement en rose et en lilas.

Wollaston, Davy, le célèbre astronome Herschell, répétèrent cette expérience et obtinrent des résultats du même genre. Les colorations trouvées ne sont pas toujours identiques. Ce fait tient à plusieurs causes : d'abord à la difficulté d'obtenir des couleurs absolument pures, *simples*, au sens technique du mot; et aussi, à ce que le mode de préparation du chlorure d'argent (ou de toute autre substance impressionnable que l'on pourrait lui substituer), influe sur la sensibilité relative qu'il présente aux diverses radiations. C'est ainsi, par exemple, que le chlorure d'argent préparé au moyen de l'azotate d'argent et de l'acide chlorhydrique, et celui préparé au moyen du même azotate et d'un chlorure alcalin, ou alcalino-terreux, ne se comporteront pas de la même façon en présence de rayons d'une même couleur.

Le choix d'un spectre comme objet coloré à reproduire, qui peut paraître singulier au premier abord, est cependant *absolument indispensable* si l'on veut opérer dans des conditions absolument nettes et chercher l'action sur la couche sensible d'une couleur déterminée à l'exclusion de toutes les autres. Les couleurs spectrales sont *simples,* tandis que celles des objets naturels, quelque pures qu'elles puissent paraître, sont toujours formées par la composition de plusieurs couleurs simples, et ne peuvent dès lors donner des résultats complexes.

Ainsi, par exemple : les verres colorés en bleu, laissent toujours passer du violet, souvent du vert, et quelquefois du rouge. La plupart des verres rouges laissent passer du jaune. Les teintes les plus éclatantes des végétaux et des animaux présentent encore plus de complications.

Il est facile de comprendre, dès lors, que si l'on soumet du chlorure d'argent à l'action d'une de ces teintes complexes, on n'obtienne plus un résultat simple, et bien défini, mais pour ainsi dire une *résultante* variable de toutes les actions exercées simultanément par chacune des couleurs simples dont la teinte étudiée se compose.

Dès la découverte de Daguerre, on vit bien que la photographie n'aurait complètement atteint son but que lorsqu'elle serait capable de reproduire les objets avec leurs couleurs, comme on peut s'en

convaincre en lisant le passage ci-après de la notice lue par François Arago, à la séance de l'Académie des Sciences du 7 janvier 1839, sur la belle découverte de Daguerre.

« On s'est demandé si, après avoir obtenu, avec le
» daguerréotype, les admirables dégradations des teintes,
» on n'arrivera pas à lui faire reproduire les couleurs,
» à substituer, en un mot, les tableaux aux sortes de
» gravures à l'aqua-tinta qu'on engendre maintenant.

» Ce problème sera résolu le jour où l'on aura
» découvert une seule et même substance que les rayons
» rouges coloreront en rouge, les rayons jaunes en jaune,
» les rayons bleus en bleu, etc. M. Niepce signalait
» déjà des effets de cette nature où, suivant moi, le
» phénomène des anneaux colorés (1) jouait quelque
» rôle. Peut-être en était-il de même du rouge et du
» violet que Seebeck obtenait simultanément sur le
» chlorure d'argent, aux deux extrémités opposées du
» spectre. M. Quetelet m'a communiqué une lettre dans
» laquelle Sir John Herschell annonce que son papier
» sensible ayant été exposé à un spectre solaire très
» vif, offrait ensuite toutes les couleurs prismatiques,
» le rouge excepté. Enfin, M. Edmond Becquerel est
» parvenu à préparer les plaques daguerriennes de
» manière à obtenir des images dont les couleurs rap-
» pellent celles des objets, mais sans pouvoir empêcher
» les images de blanchir ou de s'effacer sous l'influence
» de la lumière diffuse.

» En présence de ces faits, il serait certainement
» hasardé d'affirmer que les couleurs naturelles des
» objets ne seront jamais reproduites dans les images
» photogéniques.

(1) Nous verrons (chapitre II) que c'est justement sur la théorie des couleurs des lames minces et des anneaux colorés qu'est basée la belle méthode employée par M. G. Lippmann pour la reproduction directe des couleurs.

» M. Daguerre, pendant ses premières expériences
» de phosphorescence, avait découvert une poudre qui
» émettait une lueur rouge après que la lumière rouge
» l'avait frappée, une autre poudre à laquelle le bleu
» communiquait une phosphorescence bleue, une troisième
» poudre qui, dans les mêmes circonstances, devenait
» lumineuse en vert par l'action de la lumière verte,
» mêla ces poudres mécaniquement, et obtint ainsi un
» composé unique qui devenait rouge dans le rouge,
» vert dans le vert et bleu dans le bleu. Peut-être en
» opérant de même, en mêlant diverses résines, arri-
» vera-t-on à engendrer un vernis où chaque lumière
» imprimera, non plus phosphoriquement mais phospho-
» géniquement des couleurs.

Cependant beaucoup de savants ne croyaient pas à la possibilité du moins immédiate de la reproduction directe des couleurs par la photographie. Gay-Lussac, en particulier, était assez incrédule. Voici le jugement qu'il portait sur la découverte de Daguerre :

« La découverte de M. Daguerre vous est connue par
» des résultats qui ont été mis sous vos yeux, et par le
» rapport, à la Chambre des Députés, de l'illustre savant
» auquel le secret en avait été confié. C'est l'art de fixer
» l'image même de la chambre obscure sur une surface
» métallique et de la conserver.
» Hâtons-nous cependant de le dire, sans vouloir diminuer
» en rien le mérite de cette belle découverte, la palette du
» peintre n'est pas très riche de couleurs : le blanc et le
» noir la composent seule. L'image à couleurs naturelles et
» variées restera longtemps, à jamais peut-être, un défi
» à la sagacité humaine. Mais n'ayons pas la témérité
» de lui poser des bornes infranchissables, les succès de
» M. Daguerre découvrent un nouvel ordre de possibilités.

En 1845, Hunt avait pu reproduire le spectre

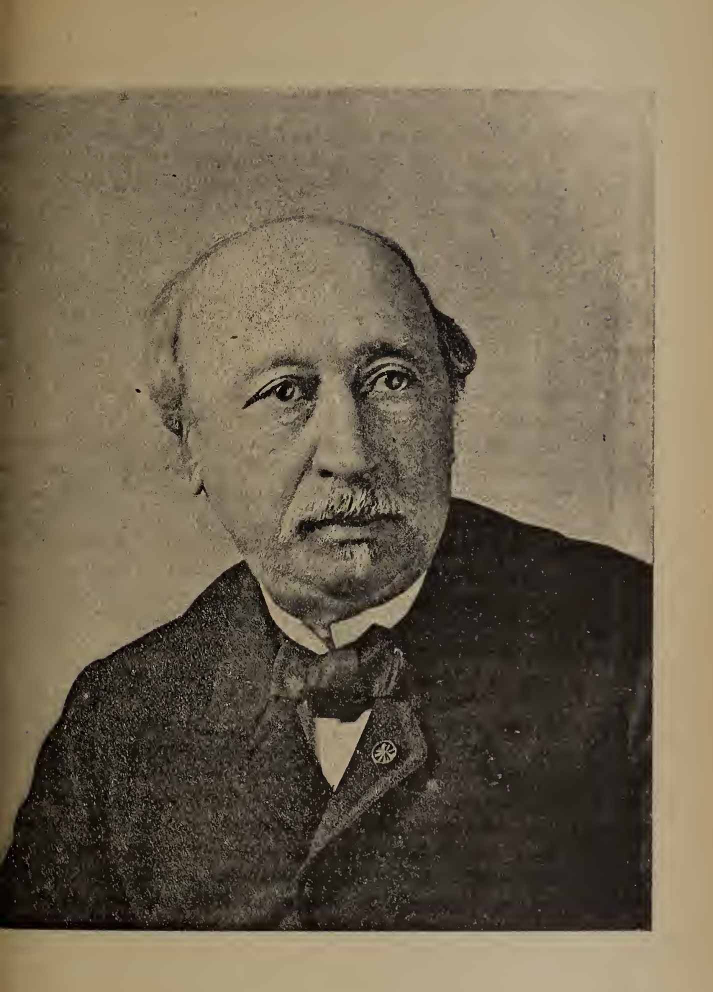
solaire en couleurs; mais les colorations obtenues disparaissent pendant le séchage du papier. Nous lisons à ce sujet dans un Manuel Roret de 1862 :

Après avoir décrit la préparation du papier pour le procédé ferrocyanotype, M. Hunt dit : « L'action du spectre » solaire sur cette préparation est assez curieuse à con- » naître; mais, pour le moment, je me contenterai d'an- » noncer que le maximum d'effet est produit par les rayons » les moins réfrangibles, et que tous les rayons, le *rouge* » *extrême* excepté, agissent sur elle avec une énergie » considérable. Dans tous les cas qui se sont présentés à » moi, l'image du spectre imprimé était distinctement » colorée d'une extrémité à l'autre, et j'ai même remarqué » que les couleurs de milieux superposés laissaient une » teinte correspondante sur le papier; mais, malheureuse- » ment, à mesure que le papier séchait, les couleurs dispa- » raissaient.

» Ce résultat fait entrevoir la possibilité de produire » éventuellement des images photographiques avec leurs » couleurs naturelles. »

C'est en 1848 qu'Edmond Becquerel (1) obtint le premier des images en couleurs du spectre solaire,

(1) Né à Paris le 24 Mars 1820, Alexandre-Edmond Becquerel entra en 1838 à l'École polytechnique; à sa sortie il assista son père, Antoine-César, physicien français, membre de l'Institut, et fut aide-naturaliste au Muséum, puis professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers, où il obtint la chaire de physique en 1853; en 1858 il succéda à son père comme professeur au Muséum. La plupart de ses travaux se trouvent dans les deux ouvrages: *La Lumière, ses causes et ses effets* (2 vol. 1867-68); *Des forces physico-chimiques et de leur intervention dans la production des phénomènes naturels* (1 vol. avec atlas, 1875), et dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences, où il fut élu en juillet 1863.



M. EDM. BECQUEREL

au moyen de la chambre noire, des images photochromatiques comme on disait alors.

Les premières expériences étaient faites au moyen de plaques chlorurées ; mais elles ne donnaient qu'un spectre où les couleurs se produisaient les unes après les autres, et se décomposaient ensuite ou changeaient de teintes par la simple prolongation d'exposition nécessaire pour obtenir les plus réfractaires. Ce n'était que lors de leur apparition qu'elles avaient une couleur vive et franche.

Depuis il a pu en obtenir qui se conservent, à condition qu'on les laisse dans l'obscurité et ne les regarde qu'à la lumière du gaz par exemple ; il en existe encore de conservées ainsi depuis de longues années dans une boîte bien close ; mais on n'a jamais pu les fixer. On se sert comme support d'une plaque d'argent ou même d'une plaque de cuivre argenté ; les anciennes plaques de Daguerréotypes conviennent parfaitement pour faire cette expérience dont nous laissons la description à M. Becquerel lui-même : (1)

« Pour préparer la couche impressionnable à l'aide de » courants électriques, on commence par décaper et chauffer la lame de plaqué d'argent ou la lame d'argent que » l'on emploie, et on lui donne un poli parfait, comme » si l'on voulait obtenir une épreuve daguerrienne ; puis

(1) Cette description est extraite de l'ouvrage de Becquerel : *La lumière, ses causes et ses effets*, tome II, page 213. Paris, 1868, ouvrage dont il préparait une nouvelle édition quand la mort est venue l'enlever.

» on suspend cette lame à l'aide de deux petits crochets » en fil de cuivre de façon qu'elle puisse être plongée au » milieu d'une masse liquide et être enlevée à volonté au » moyen du fil R qui est formé par la réunion des deux » fils de cuivre. Le liquide dans lequel on plonge la lame » est de l'eau aci- » dulée par de l'aci- » de chlorhydrique » dans les propor- » tions de 8 litres par 1 litre » d'acide ordinaire. On attache » alors les fils de cuivre qui » forment les supports en cro- » chets de la lame au pôle » positif de la pile qui doit » agir, et l'on plonge la lame » au milieu de la dissolution » au moment même d'opérer. » La pile est formée d'un ou » plusieurs couples à acide » azotique, suivant l'étendue » de la lame et la disposition » de l'appareil, sans l'addition dont il va être question » plus loin, si l'on opère avec des quarts de plaque da- » guerrienne ($0^m,016$ sur $8^c$.) il faut un couple à acide azo- » tique fortement chargé. Avec des demi-plaques, deux » couples sont nécessaires, et même trois pour des plaques » entières.

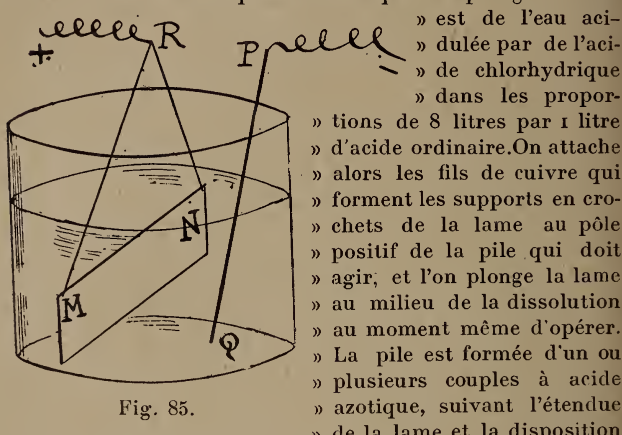


Fig. 85.

» Lorsque la lame est dans le liquide et se trouve » maintenue verticalement, on plonge dans ce même » bain un fil de cuivre ou de platine en communication » avec le pôle négatif des couples, afin de former le » circuit voltaïque. On promène le fil dans le liquide » parallèlement à la surface argentée de la lame et à 8 » ou 10 centimètres de distance.

» Alors on voit des bulles d'hydrogène se détacher » de ce fil, tandis que la surface d'argent se colore par » suite du transport du chlore provenant de la décompo- » sition de l'acide chlorhydrique. Si l'on promène le fil » en face de la lame, la coloration de toute la surface

» est la même, et celle-ci change également de nuance » dans tous les points ; mais si l'on n'avait pas cette » précaution la surface sensible n'aurait pas partout la » même épaisseur.

» Les nuances qui se produisent sur la lame sont » celles des lames minces ou des anneaux colorés vues » par transmission, et sont analogues à celles des dépôts » des oxydes métalliques à la surface des métaux.

» La surface de la lame commence à se colorer en gris, » puis prend des teintes jaunâtres, violettes, vertes, qui » se succèdent à mesure que le dépôt augmente d'épaisseur.

» Quand on veut se baser seulement sur la teinte du » dépôt pour juger de son épaisseur, il faut opérer dans une » pièce peu éclairée, retirer la lame d'argent du bain à plu» sieurs reprises et s'arrêter à la teinte convenable, qui est, » en général, du 3e, du 4e ou du 5e ordre, suivant les expé» riences que l'on a en vue, et ainsi qu'on le dira plus loin.

» Quand on a atteint le degré voulu, on lave la plaque » à l'eau distillée, puis on la fait sécher en l'inclinant » légèrement et en la chauffant à l'aide d'une lampe à » alcool, soit en insufflant de l'air à la surface pour » accélérer l'évaporation. On juge exactement de l'ordre » de l'épaisseur de la couche impressionnable en regardant » la surface près du bord, vers les points où les crochets » en cuivre étaient attachés ; on observe une suite d'an» neaux colorés qui entourent ces points, se succèdent » avec régularité et viennent se fondre avec la nuance » générale de la plaque.

» Si l'on examine la plaque à l'aide de la lumière d'une » lampe, elle paraît recouverte d'une légère poussière » blanchâtre formant comme un faible voile. Pour l'enlever, » on place cette plaque sur le cadre à polir, et on passe, » à différentes reprises, à sa surface, un polissoir en velours. » Elle devient brillante, acquiert une teinte bois assez » foncée et est alors éminemment propre à recevoir les » impressions colorées des différentes parties du rayon» nement lumineux. Ce léger poli, après le dépôt de la » couche sensible, est nécessaire pour donner de la viva» cité aux nuances qu'on veut obtenir.

» On peut rendre ce procédé d'une application facile et

» certaine en déterminant, dans chaque circonstance et à
» chaque instant, la quantité de chlore que l'on met à la
» surface de la lame d'argent. Pour cela on interpose, dans
» le circuit composé de la pile et du bain d'eau acidulée par
» l'acide chlorhydrique dans lequel plonge la lame attachée
» au pôle positif, un voltamètre à eau ; de cette manière,
» le courant qui décompose l'acide chlorhydrique et trans-
» porte le chlore sur l'argent décompose aussi l'eau acidulée
» du voltamètre.

» Les décompositions électro-chimiques ayant lieu en
» proportions définies, il se porte autant de chlore en
» volume sur la surface de la lame d'argent qu'il se dégage
» de gaz hydrogène dans l'éprouvette placée au-dessus de
» l'électrode négative du voltamètre ; si donc on recueille
» ce gaz, on voit à chaque instant à quel point en est la
» préparation. Pour opérer ainsi, il faut garantir avec un
» vernis le verso de la lamc de plaque, afin que le cuivre
» soit préservé et que l'argent métallique soit seul attaqué
» par le chlore provenant de la décomposition de l'acide
» chlorydrique.

» On a pu, par ce moyen, préparer les lames dans
» l'obscurité et avoir des couches uniformes et d'une épais-
» seur déterminée. D'après cette addition du voltamêtre,
» l'on peut dire que cette méthode de préparation est la
» seule qui puisse donner, dans des expériences de ce
» genre, des couches impressionnables identiques à elles-
» mêmes. Mais il est nécessaire, quand on opère ainsi,
» d'employer un plus grand nombre de couples que lors-
» qu'on ne se sert pas du voltamètre et cela pour vaincre
» la résistance introduite ainsi dans le circuit.

» Ainsi, pour des lames dites quart de plaque, il
» faut au moins trois couples à acide azotique fortement
» chargées ; pour des 1/2 plaques et des entières 4, ou même
» 6 couples. Pour les expériences courantes, il est inutile,
» dans la mesure du gaz dégagé par le voltamètre, de faire
» la correction de la pression et de la tension de la vapeur
» d'eau, il suffit de maintenir la température à 10 ou 12°
» et de disposer l'éprouvette graduée de façon que le gaz
» hydrogène soit pris à la pression ordinaire au moment où
» on observe son volume. »

» Il résulte des déterminations faites à l'aide de prépa-
» rations opérées sur des surfaces d'argent de $0^m,106$ sur $8^c$,
» qu'en rapportant tout à l'unité de surface, et en évaluant
» le chlore d'après le volume de l'hydrogène du voltamètre
» détermine en centimètres cubes, il faut par décimètre
» carré :

» $2^{cc},80$ de chlore pour que la teinte violette de la couche
» du $2^e$ ordre commence à paraître.

» De $3^{cc},80$ à $3^{cc},90$ pour la teinte violette du $3^e$ ordre
» donnant déjà de bonnes impressions colorées.

» De $6^{cc},50$ à $6^{cc},90$ pour que la couche du $4^e$ ordre ait une
» épaisseur suffisante pour donner de belles reproductions
» des spectres lumineux.

» Si l'on avait la densité exacte de ce chlorure, rien ne
» serait plus facile que de déduire des résultats précédents
» l'épaisseur de la couche impressionnable. Or, comme on
» ne connaît pas sa composition chimique, on ne peut faire
» que des suppositions à ce sujet. En admettant, par
» exemple que la densité de ce chlorure soit la même que
» celle du chlorure blanc fondu et que cette densité soit
» 5,277, on trouve que chaque centimètre cube de chlore don-
» nerait sur $1^{dm}$ de surface d'argent une couche de chlorure
» d'une épaisseur de $\frac{1}{4120}$ de millimètre ; cela ferait pour
» l'épaisseur correspondant à 4 $C^m$ cubes $\frac{1}{1030}$ de millimètre et
» pour 7 $C^m$ cubes $\frac{1}{588}$ de millimètre. Mais vu l'incertitude
» où l'on est sur la composition du corps impressionnable,
» on doit s'en tenir à la détermination de la quantité de
» matière d'après la proportion de chlore transportée sur la
» surface de la lame d'argent.

» Je ferai remarquer que ce procédé se prêterait bien à
» la détermination de l'épaisseur des lames minces pro-
» duites au moyen des actions électriques à la surface des
» plaques métalliques par l'oxyde de plomb, de manganèse,
» etc., suivant la méthode expérimentale découverte par
» mon père.

» En laissant le courant électrique agir plus longtemps
» qu'il vient d'être dit, la lame devient noire par suite d'une
» plus grande épaisseur du chlorure d'argent mais ne don-
» nerait pas d'aussi bons résultats sous l'action de la lumière.

» Il faut opérer entre les limites de 4 à 7 centimètres de
» chlore par décimètre carré, selon l'épaisseur de la couche
» dont on a besoin. Plus la couche est mince, plus sa subs-
» tance est impressionnable, mais aussi moins les nuances
» colorées sont belles. Les plaques préparées ainsi peuvent se
» conserver à l'abri de la lumière aussi longtemps que cela
» sera nécessaire et reçoivent toujours également bien les
» impressions colorées. »

## II

## Historique (*Suite*).

### Recherches de Niepce de St-Victor et de Poitevin.

Une mystification. — Expériences de Niepce de St-Victor. — Théories de Tillemann. — Expériences de Poitevin. — Photographie directe du spectre solaire par Abney. — Recherches diverses.

En 1851 les journaux américains affirmèrent qu'un photographe des États-Unis, M. Hill, un révérend pasteur, avait découvert le moyen de reproduire les images de la chambre noire avec leurs couleurs naturelles. Cette nouvelle mit en émoi tous les photographes. L'habile pasteur laissa les journaux combler d'éloges sa découverte et, quand il jugea la fièvre de la curiosité publique suffisamment accrue, il « lança une circulaire
» (dit M. Alexandre Ken (1) à qui nous empruntons cette
» curieuse histoire), dans laquelle il promettait de publier
» prochainement un ouvrage qui divulguerait les secrets

(1) [A.] KEN. — Dissertations sur la photographie, 1864.

» de sa découverte. L'auteur ajoutait que ce livre ne serait
» tiré qu'à un nombre égal à celui des photographes sous-
» cripteurs, et qu'il serait envoyé cacheté à tous ceux qui
» lui feraient parvenir, avec leur adresse, cinq dollars (25
» francs). Un certificat, signé de plusieurs noms, affirmait
» que M. Hill était un respectable ecclésiastique digne de
» toute confiance.

» La circulaire produisit 5.000 dollars. Le volume parut :
» il avait environ cent pages et revenait à l'auteur à peu
» près à 25 centimes l'exemplaire. Mais, s'il était cher, il ne
» contenait, en revanche, que quelques banales descriptions
» des procédés de Daguerréotypie les plus connus et ne disait
» pas un mot de la reproduction des couleurs. »

M. Hill put ainsi publier deux ou trois éditions de sa brochure; mais on ne tarda pas à savoir ce qui en était.

C'est pendant la même année (1851) que Niepce de Saint-Victor, le neveu de Niepce, reprit les expériences de Becquerel.

Il partit du même principe que lui : une plaque d'argent plongée dans un bain de sulfate de cuivre et de chlorure de sodium est en contact avec le pôle positif d'une pile; elle se chlorure et devient apte à reproduire les couleurs, hors du bain, sous l'influence de la lumière.

Une plaque d'argent pur est parfaitement décapée avec du tripoli et de l'ammoniac, comme dans le procédé de Daguerre et avec les mêmes appareils.

On opère alors à peu de chose près comme dans le procédé Becquerel.

Niepce a pu se passer de la pile en employant un

certain nombre de bains dont les suivants lui ont donné les meilleurs résultats :

| | |
|---|---|
| Eau distillée. . . . . . . . . . . . | 400 |
| Sulfate de cuivre . . . . . . . . . | 100 |
| Chlorure choisi . . . | En proportion variable avec les couleurs à obtenir. |

La plaque d'argent est immergée 5 à 10 minutes dans ce bain maintenu à + 10°, suivant la force du bain et l'épaisseur de la couche dont on a besoin.

On peut obtenir toutes les couleurs, mais peu vives, sur fond blanc, en prenant :

| | |
|---|---|
| Eau distillée. . . . . . . . . | 300 |
| Chlorure de fer. . . . . . | 1 |
| Sulfate de cuivre . . . . . | 4 |

On les obtient plus vives, sur fond sombre et rougeâtre, en se servant du bain :

| | |
|---|---|
| Eau distillée. . . . . . . . . . | 1000 |
| Chlorure de magnésium. . . | 100 |
| Sulfate de cuivre . . . . . . | 50 |

Dans ces bains la plaque prend une couleur obscure, presque noire, et si on l'exposait telle quelle à la lumière, les couleurs ne viendraient que lentement et sur fond noir. Il faut la chauffer avec la flamme d'une lampe à alcool en agissant avec précaution; la couleur de la plaque devient successivement rouge-brun, rouge-cerise, rouge-vif, rouge-blanc et blanc. Il faut s'arrêter à la couleur rouge cerise pour avoir le meilleur résultat.

Une telle plaque peut être impressionnée indifféremment à la chambre noire ou par contact.

Le temps de pose, très long, est d'au moins 2 ou 3 heures à la chambre noire.

Si, au sortir du bain chlorurant, on se contente de sécher la plaque sans la chauffer, on obtient souvent, en l'insolant derrière une gravure coloriée, une reproduction en couleurs de cette gravure; mais souvent les couleurs restent latentes et ne deviennent visibles qu'en frottant doucement la plaque avec un tampon de coton imbibé d'ammoniaque, ayant déjà servi à nettoyer une plaque.

Niepce a étudié l'action d'un grand nombre de chlorures et les a classés selon leur mode d'action.

1[re] *Catégorie* : donnent toutes ou plusieurs couleurs du modèle : chlorure de cuivre, fer, nickel, potassium; hypochlorite de soude et de chaux; eau de chlore.

2[e] *Catégorie* : ne donnent pas d'images colorées : chlorures d'arsenic, antimoine, brome, bismuth, iode, or, platine, soufre.

3[e] *Catégorie* : Reproduisent les couleurs si on les mélange à un sel de cuivre : chlorure d'aluminium, de baryum, de cadmium, de calcium, de cobalt, d'étain, manganèse, magnésium, phosphore, sodium, trontium, zinc et acide chlorhydrique.

4[e] *Catégorie* : Chlorures qui, mélangés à un sel de cuivre, s'impressionnent sans donner les couleurs : chlorure de mercure et chlorate de plomb.

En 1862, Niepce, en faisant des recherches pour essayer de fixer les couleurs ainsi obtenues sur plaque d'argent chlorurée, trouva moyen de les

obtenir plus vives que par les procédés précédents :

Avant l'exposition à la lumière, on étend sur la plaque un vernis composé d'une solution saturée de chlorure de plomb fondu et obtenu directement par le métal, dissolution dans laquelle on ajoute de la dextrine en quantité suffisante pour que le vernis ait une certaine consistance. Après l'avoir laissé déposer vingt-quatre heures, on le décante. Le vernis versé sur la plaque, on l'égoutte par un angle en séchant avec une lampe à alcool.

On obtient ainsi des couleurs bien plus intenses.

Si on regarde une telle plaque exposée sous un certain angle d'incidence, les couleurs paraissent beaucoup plus vives et les tons prennent toute leur intensité. Les regardant aux rayons solaires on a de belles couleurs : les galons d'or et d'argent, les pierres fines se reproduisent très bien. Il en est de même de l'œil de la plume de paon, en opérant dans la chambre noire ; il se reproduit tel que sa couleur apparaît sous une certaine incidence, tantôt vert, tantôt bleu.

Un an après, en 1863, un modeste savant nommé Tillemann, étudia les difficultés de l'*héliochromie* et, si on lit attentivement les lignes suivantes qu'il a écrites, on y trouve la théorie de l'expérience de M. Lippmann :

« Il n'est pas sans intérêt pour les photographes praticiens d'avoir quelques explications claires et succinctes, » et sur les causes des phénomènes lumineux, et sur les

» perfectionnements et les difficultés que comporte l'obten-
» tion des couleurs naturelles sur les couches sensibles. On
» peut réduire succinctement toutes les réflexions aux
» remarques suivantes :

» 1° L'action de la lumière a lieu à travers un milieu
» éthéré ondulant et produit trois genres d'effets distincts,
» savoir : effets coloriques, calorifiques et actiniques.

» 2° L'effet colorant résultant de l'action d'une seule
» nature d'onde, dépend probablement des variations har-
» moniques qui se développent en proportion de la vélocité
» des ondes Ces ondes produisent l'image visible à l'œil
» dans la chambre noire, mais ont peu ou point d'influence
» pour produire les effets invisibles sur les plaques pré-
» parées.

» 3° Les ondes de plus haute vélocité possèdent le pou-
» voir actinique qui est gradué par la somme de lumière
» envoyée par chaque point de l'objet à copier.

» 4° Il est évident que les rayons actiniques, étant la
» principale, sinon la seule cause des changements chimi-
» ques, doivent imprimer leur caractère propre à la pré-
» paration chimique, à l'exclusion de ceux qui appar-
» tiennent à l'action calorifique.

» 5° Les rapports de vélocité des ondes développant
» l'impression de la couleur sont généralement détruits
» au moment où ces ondes agissent sur la plaque, comme
» le rapport de gouttes d'eau tombantes disparaît quand
» ces gouttes sont mêlées ensemble. De plus, les atomes
» de la couche sensible doivent revêtir le mouvement
» vibratoire des ondes frappantes, l'action n'ayant plus
» besoin d'être de longue durée, parce que la même espèce
» de matière ne peut avoir différentes valeurs de vibra-
» tions chacune normales et permanentes.

» 6° Outre un changement dans le mouvement molé-
» culaire, nous pouvons concevoir un changement dans
» la position et l'arrangement des molécules, comme
» quand on présente une lame mince qui peut avoir pour
» effet de décomposer la lumière et de réfléchir un grand
» nombre de teintes délicates, comme il arrive pour
» l'écaille de l'huître perlière. Il est possible que ce
» changement mécanique soit aussi permanent que le

» changement chimique produit par les rayons actiniques.
» Déjà, il a été produit par l'expérience que les ondes
» éthérées ont le pouvoir d'agréger et de disposer les
» molécules ou les atomes

» 7° Les changements chimiques produits par la lumière
» peuvent différer absolument en degrés à cause de l'homo-
» généité de la substance qui couvre la plaque sensible, et
» en vue de ce cas, le savant est à l'abri, en s'assurant
» que les couleurs de la nature ne peuvent être imitées
» jusqu'à ce que nous ayons parfaitement sous notre con-
» trôle les matières avec lesquelles elle travaille. Ainsi, les
» quelques éléments dont elle se sert pour produire les
» couleurs magnifiques du royaume végétal, sont bien loin
» d'être reproduites par aucun maître. Ces couleurs ne
» sont point superficielles, elles sont le résultat d'une
» structure intérieure. L'arrangement graduel et systéma-
» tique de chaque cellule s'accorde avec le pouvoir de la
» croissance : quand chacun pourra tisser des atomes à
» son gré et combiner les substances élémentaires avec les
» moyens que la chimie met en notre pouvoir, et qui sont
» si loin de ce qu'il faudrait, il pourra construire alors le
» fondement d'une représentation chromatique. Mais quant
» à préparer une surface avec quelques-uns des composés
» actuellement connus en chimie, qui puisse donner la
» totalité de la gamme des couleurs permanentes, c'est une
» proposition qui ne peut être soutenue. »

En 1865, Poitevin (1), à qui l'on doit de nombreuses découvertes en photographie et dont les recherches donnent lieu chaque jour à des applications nouvelles, eut l'idée de faire des épreuves en couleur sur papier et fit à ce sujet une communication intéressante à la séance du 12 janvier 1866 de la Société française de photographie.

(1) Nous ne saurions trop engager nos lecteurs à lire le *Traité des Impressions positives* de Poitevin, publié par Vidal. — Paris, Gauthier-Villars, 1883.

Il commence par préparer un papier recouvert d'une couche de sous-chlorure d'argent violet par le procédé suivant que nous extrayons d'une communication faite à la séance du 7 décembre de la Société française :

« Je forme à la surface du papier photographique, non
» albuminé, une couche de chlorure d'argent ordinaire, en
» appliquant chaque feuille, et d'un seul côté, sur un bain
» de chlorure de sodium à 10 de sel pour 100 d'eau ; après
» dessiccation, je l'applique sur du nitrate d'argent à 8
» pour 100 ; j'arrive au même but, en recouvrant, au moyen
» d'un large pinceau, l'un des côtés du papier d'une couche
» d'un mélange de dissolution de bichromate de potasse à
» saturation et de sulfate de cuivre à 10 pour 100 fait à
» volumes égaux ; je laisse sécher la feuille dans l'obscurité,
» puis j'applique la surface préparée sur le bain de nitrate
» d'argent ; il se forme du chromate d'argent ; je lave à
» grande eau pour enlever l'excès de nitrate, et j'ajoute à
» la dernière eau de lavage, et goutte à goutte, de l'acide
» chlorhydrique ordinaire, jusqu'à ce que le chromate rouge
» soit transformé en chlorure blanc d'argent. Ces deux
» moyens de préparer la couche de chlorure d'argent sont
» également bons. Pour obtenir le sous-chlorure violet, je
» verse dans la cuvette contenant la feuille de papier
» immergée dans l'eau une petite quantité de dissolution de
» protochlorure d'étain à 5 pour 100 d'eau ordinaire, il en
» faut environ 20 centimètres cubes par feuille entière,
» j'expose alors, et sans la retirer du bain, la feuille à la
» lumière, à l'ombre plutôt qu'au soleil ; sa surface se teinte
» promptement, et après cinq à six minutes elle a acquis la
» teinte violet foncé voulue.

» Il ne faudrait pas laisser davantage agir la lumière,
» car on obtiendrait un ton noir grisâtre, impropre à
» l'hélio-chromie. Après l'action de la lumière, je lave la
» feuille à plusieurs eaux, et je la laisse sécher dans
» l'obscurité. Dans cet état elle est très peu sensible à
» l'action de la lumière, et elle peut être conservée pendant
» très longtemps, ce qui permet d'en préparer un certain

» nombre à l'avance, pourvu qu'on les conserve dans
» l'obscurité. »

Poitevin, avant de se servir de la feuille ainsi préparée, appliquait sur sa surface, au moyen d'un pinceau, un liquide formé par le mélange de 1 volume de dissolution aqueuse à 5 % de bichromate de potassium, 1 volume de solution saturée de sulfate de cuivre et 1 volume de solution à 5 % de chlorure de potassium et la laissait sécher. Puis il insolait derrière des peintures sur verre, avec un temps de pose de cinq à dix minutes. Ces images ne sont pas plus stables que celles de Becquerel. Cependant Poitevin a pu assurer leur conservation en employant un fixateur convenable :

« J'ai reconnu aussi, écrit-il dans la communication
» déjà citée, que le meilleur fixateur est de l'eau légèrement
» acidulée par de l'acide sulfurique ou bien une dissolution
» très diluée de bichlorure de mercure également acidulée
» par de l'acide sulfurique. L'eau acidulée dissout certains
» composés d'argent qui se sont formés sur les endroits
» insolés, et, après lavage et dessiccation dans l'obscurité,
» l'image en couleur n'est presque plus sensible à la lumière;
» on peut la conserver sans altération dans un carton ou un
» album, et même la regarder à la lumière diffuse et surtout
» à la lumière artificielle, sans aucun inconvénient. »

Les expériences de Poitevin ont été reprises par un certain nombre d'inventeurs qui ont perfectionné ses expériences, malheureusement sans arriver à obtenir la fixité absolue des images. M. Valton a continué ces expériences en modifiant légèrement le procédé Poitevin. Ici la pose augmente de durée et

devient de 3/4 d'heure, même au soleil. On avive les couleurs en les plongeant dans le liquide suivant :

| | |
|---|---|
| Eau. . . . . . . . . . . . . . . . | 1.000 gr. |
| Acide sulfurique . . . . . . . | 20 gr. |

et on lave. Elles ne résistent guère mieux que les précédentes. En recouvrant les épreuves d'une couche de sulfate de quinine, M. Valton les a rendues plus stables. En ajoutant au sulfate de quinine un peu de safran, les épreuves deviennent encore plus solides mais elles prennent une teinte jaunâtre peu agréable. M. Chardon, qui a également continué ces essais. a obtenu de bons résultats, mais qui présentent toujours le même défaut capital de s'effacer lentement à la lumière.

En 1866, Wharton-Simpson, en appliquant, sur une plaque de verre opaline, une couche de collodio-chlorure d'argent contenant :

| | |
|---|---|
| Collodio-chlorure . . . . . . . . | 30 |
| Chlorure de strontium. . . . . | 0,13 |
| Azotate d'argent. . . . . . . . | 0,325 |

la séchant devant le feu et l'exposant à la lumière diffuse du jour jusqu'à ce qu'elle fût devenue gris lavande foncé ou teinte ardoise, obtient en l'insolant derrière des verres de couleur, durant une demi-journée, des couleurs très vives différant peu de celles des verres de couleur employés.

La même année, J. Traill Taylor aurait obtenu les couleurs naturelles des objets sur papier en imbi-

bant d'abord d'azotale d'argent, puis de fluorure de sodium; il aurait ainsi obtenu le vert, le bleu et le jaune du spectre d'une manière remarquable. Il affirme aussi que le papier imprégné d'oxyde d'argent dissous dans l'azotate d'ammonium, ainsi que le papier préparé au chlorure de baryum et à l'azotate d'argent, préalablement imprégné d'une solution d'iode reproduisent parfaitement les couleurs.

En 1874, M. de St-Florent, obtenait de la manière suivante des reproductions colorées sur papier. On prépare le liquide suivant :

| | |
|---|---|
| Eau distillée . . . . . . . . . . . . . . . . . | 20cc |
| Azotate d'argent. . . . . . . . . . . . . . . . | 20 g. |

Après dissolution on ajoute :

| | |
|---|---|
| Alcool. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 100cc |
| Acide azotique . . . . . . . . . . . . . . . | 10cc |

La feuille plongée dans ce bain, est séchée et passée dans la solution suivante :

| | |
|---|---|
| Acide chlorhydrique . . . . . . . . . . . . | 50cc |
| Alcool. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 50cc |
| Azotate d'urane . . . . . . . . . . . . . . . . | 1 g. |
| Oxyde de zinc. . . . . . . . . . . . . . . . | 1 à 5 g. |

Au sortir de ce mélange la feuille est exposée au soleil jusqu'à ce qu'elle devienne violette. On recommence ensuite les deux mêmes opérations jusqu'à ce qu'on ait obtenu une teinte suffisamment

intense. C'est le seul procédé connu pour avoir de belles images.

On trempe ensuite dans la solution suivante :

| | |
|---|---|
| Eau | $100^{cc}$ |
| Nitrate acide de mercure | 4 à 5 gttes |

On expose trente à quarante secondes au soleil à travers un verre coloré. Les couleurs sont plus belles en ajoutant au liquide précédent :

| | |
|---|---|
| Solution saturée de bichromate de potasse | $2^{cc}$ |
| Acide sulfurique | $2^{cc}$ |
| Chlorure de potasse | 1 g. |

On lave à grande eau et on fixe (à peu près) dans :

| | |
|---|---|
| Ammoniaque | $5^{cc}$ |
| Alcool | $100^{cc}$ |

On lave, on passe dans un bain saturé de chlorure de potassium, et on lave de nouveau. L'épreuve résiste assez longtemps.

Plus tard, en 1882, M. de Saint-Florent employa des émulsions au collodio-chlorure et au gélatino-chlorure d'argent.

» Le collodio-chlorure, dit-il, est préparé en versant
» lentement dans du collodion un peu épais, contenant du
» chlorure de cobalt ou du chlorure de magnésium, du nitrate
» d'argent dissous dans son poids d'eau et additionné
» d'alcool. Le collodio-chlorure est versé en pleine lumière
» sur des cartons assez épais et exposé à la lumière jusqu'à

» ce qu'il ait pris une couleur violacée assez foncée. Ainsi » préparés les cartons se conservent indéfiniment à l'obscu- » rité dans un endroit sec.

» Pour copier une estampe colorée ou une image sur » verre, il n'y a aucune nouvelle préparation à lui faire » subir, on opère comme pour obtenir un positif.

» L'épreuve vient beaucoup plus rapidement en concen- » trant les rayons solaires sur le châssis au moyen d'une » forte lentille. Il vaut encore mieux employer un appareil » d'agrandissement ordinaire.

» Ces couleurs sont généralement assez faibles; on aug- » mente leur vivacité par le procédé suivant :

» Le carton préparé insolé jusqu'à la teinte violacée, est » recouvert d'une couche de gélatino-chlorure d'argent émul- » sionné dans l'acide acétique additionné d'alcool. On expose » quelques minutes à la lumière et on tire les épreuves » héliochromiques quand le carton est sec.

» On peut aussi appliquer les deux couches successi- vement, sans exposer préalablement la première à la lumière. Les deux couches noircissent simultanément. »

M. de Saint-Florent est aussi parvenu à reproduire les couleurs au moyen d'une préparation contenant du *sous-oxyde* d'argent.

« On plonge, expose-t-il, le papier dans une solution de » nitrate d'argent à 10 °/₀ ; on sèche dans un buvard, et on » immerge dans un bain de potasse caustique pure à 20 °/₀.

» La feuille, retirée sans être lavée, est exposée à la » lumière jusqu'à ce que sa couleur brun clair soit passée » au brun foncé. La feuille sèche est placée derrière une » image colorée *sur papier* et exposée plusieurs heures en » plein soleil.

» L'image se reproduit alors avec ses couleurs, mais le » bleu, le rouge et l'orangé dominent, le vert est gris et le » violet presque bleu. Chose remarquable, l'orangé et le bleu » sont souvent remplacés par leurs complémentaires (1). »

(1) *Bulletin de la Société française de photographie*, janvier 1882.

En 1879, le capitaine Abney envoya à la Société royale de Londres une note dans laquelle il dit que dans la reproduction des couleurs naturelles par la lumière, selon le procédé Becquerel, les colorations obtenues sont dues à une oxydation du mélange d'argent employé et non à des interférences. Il accompagna sa note d'images du spectre solaire sur plaques à l'argent et sur des composés d'argent tenus en suspension par le collodion. Le spectre s'était imprimé, dit-il, approximativement avec ses couleurs naturelles ; il était plus brillant sur les plaques d'argent que sur les couches de collodion, mais pour ces dernières, on les voit aussi bien par la lumière transmise que par réflexion. Une exposition de deux minutes lui avait suffi pour reproduire les couleurs du spectre.

Selon M. Abney, la matière colorante semble être due à deux *grandeurs* ou *molécules* différentes de la même composition chimique, dont l'une absorbe le bleu et l'autre le rouge du spectre. Les volumes de ces molécules sont inaltérables pendant qu'elles sont exposées aux mêmes ondulations que celles par lesquelles elles ont été produites. En outre, Abney croyait à la possibilité et à la probabilité de la stabilité des couleurs exposées à la lumière du jour.

On verra, par les autres chapitres (II et III), combien cette théorie était erronée.

M. de Saint-Florent n'a pu trouver de moyen pratique de fixer convenablement ces images.

En 1890, M. de Klausenburg est parvenu à reproduire des vitraux à l'aide d'émulsions au collodion-chlorure d'argent.

Il faut poser trois heures pour obtenir des images sur verre et jusqu'à trois jours pour obtenir des couleurs sur papier. On fixe approximativement dans un bain alcalin qui rend les couleurs plus vives. Elles ne concordent pas toujours avec celles du modèle.

Vers le commencement de l'année 1891, un mois avant la célèbre découverte de M. G. Lippmann, la *Photo-Gazette* (1), une des plus intéressantes revues illustrées consacrées à la photographie, donna des traductions d'articles récents parus à l'étranger sur la reproduction directe des couleurs; nous les rapportons ci-dessous, tout en faisant remarquer avec le rédacteur du journal en question, que certains passages relatifs au *fixage avant l'exposition*, dans un bain qui augmente la sensibilité, paraissent extraordinaires et invraisemblables.

On prépare une solution de perchlorure de fer à 1 : 4. On met en contact une lame d'argent avec le pôle positif d'une pile, tandis que le pôle négatif est relié à une lame de platine. Les deux lames sont ainsi introduites simultanément dans la solution de chlorure. La superficie de l'argent passe rapidement du vert au rouge, lilas, brun,

(1) Rédigée par G. Mareschal. Paris, G. Carré.

et finalement au noir. On retire la lame quand sa couleur est lilas ou rouge brun, en un mot, quand la couche de chlorure est assez épaisse pour couvrir complètement la superficie de l'argent. Si on se sert d'une batterie composée de deux éléments Grove de grandeur ordinaire, transformés en pile Snée et pleine d'acide sulfurique dilué assez pour que l'hydrogène ne se dégage que lentement sur la lame de platine, l'opération dure seulement deux minutes. La lame d'argent ainsi rendue sensible est alors lavée abondamment avec de l'eau distillée et séchée sur une lampe à alcool. Par l'effet de la chaleur, le dépôt prend des teintes qui varient du brun au rouge. Le maximum de sensibilité est atteint quand la lame est rouge cerise. La température ne doit pas dépasser 100 degrés centigrades.

On expose alors la plaque dans une chambre noire. Si la lumière est très forte, les couleurs se manifestent au bout de deux ou trois heures, et l'image est complète en cinq ou six heures, sans laisser rien à désirer, tant sous l'aspect des couleurs que de la forme. On dirait une miniature avec beaucoup de finesse dans les détails et les demi-teintes les plus délicates. L'image peut être fixée en immergeant la plaque, avant l'exposition, dans une légère solution de chlorure de sodium : Cette opération augmente cependant la sensibilité.

Il existe cependant d'autres agents fixateurs, mais tous augmentent la sensibilité et diminuent le brillant des couleurs.

La seule difficulté qui existe dans la pratique de ce procédé est le calcul du temps de pose.

L'image résiste à la chaleur et aux agents chimiques ordinaires, mais disparaît rapidement dans l'hyposulfite de soude. Une image non exposée suffisamment peut donner de bons résultats en la développant dans une solution de sulfate de fer et de bichromate de potasse.

Si, au contraire, la plaque avait été trop exposée, on pourrait la baisser avec une faible solution d'ammoniaque. Une légère couche de vernis diaphane augmente l'effet des couleurs.

M. Campbell a poursuivi ses intéressantes recherches spécialement dans le but de réduire le temps de l'exposi-

tion. A cet effet, il a fait agir la lumière à travers une couche d'hydrogène, et ainsi la pose se trouve réduite à une heure, sans nullement nuire à la vivacité des couleurs.

Après avoir essayé plusieurs produits liquides ou gazeux, M. Campbell a substitué à l'hydrogène l'anhydrite sulfureux et obtenu alors une image complète en une demi-heure. Un carbure d'hydrogène qui doit être l'éthylène, agit encore plus rapidement, à tel point que la photographie peut être obtenue en 5 minutes ; cependant avec ces deux derniers produits, les couleurs sont quelque peu affaiblies.

*(Scientific American).*

M. Gaedicke, de Berlin, a obtenu des impressions photographiques en couleur sur papier au gélatino-chlorure d'argent, en l'exposant à la lumière de façon à lui faire prendre une teinte brun rougeâtre, ensuite en la baignant dans une solution concentrée de sulfate de cuivre mêlée à égal volume d'une autre solution à 5 °/₀ de bichromate de potasse ; puis la séchant dans l'obscurité et enfin l'exposant à la lumière dans un verre coloré. Il faut exclure de l'image tout rayon extra violet au moyen d'un verre couvert d'une solution de gélatine dans laquelle on a ajouté quelques traces d'urœne ou d'esculine. Sous un verre jaune, le papier prend une teinte jaune ; sous un verre rubis, une teinte vermillon ; avec un verre vert, olive ou cobalt, il devient brun.

L'image est lavée dans l'eau légèrement acidulée sulfurique, et peut se conserver ainsi inaltérable pendant longtemps.

L'éditeur de la *Revue Suisse de photographie* s'intéresse vivement aux recherches de M. François Veresez, de Clausenbourg. Malgré le discrédit que plusieurs journaux cherchent à jeter sur les travaux de l'éminent photographe, il lui écrivit pour obtenir quelques-unes de ses dernières épreuves de photographies des couleurs. Le gendre de M. V., M. Ch. Szilagyi, lui fit la réponse suivante :

Budapest, le 7 septembre 1890.

Monsieur,

M. Fr. Verescz a reçu votre honorée du 8 août, et j'ai le plaisir de vous répondre en son nom et de vous remercier pour les deux numéros de votre Revue que vous avez eu l'obligeance de lui envoyer. Mon beau-père a réussi à diminuer notablement la durée de la pose, et il regrette vivement de ne pouvoir consacrer un temps suffisant à ces expériences. Il a cependant continué ses recherches, et il a commencé il y a peu de jours l'étude d'un procédé nouveau au moyen duquel il a obtenu les épreuves en couleurs ci-incluses. Elles sont produites par deux différents collodio-chlorures d'émulsion argentique (?). Il est inutile d'ajouter que M. Verescz n'a pas encore eu le temps d'éprouver la fixité de cette nouvelle méthode ; en attendant, ayez le soin de tenir les épreuves à l'abri d'une lumière vive.

Votre dévoué

Ch. Szilagyi.

Cette lettre était accompagnée de deux superbes épreuves en couleurs, des reproductions de tableaux de l'école hollandaise.

Les couleurs sont très visibles et fondues en tons très chauds. Si elles sont durables, elles auront constitué un progrès notable.

Voici d'autre part, d'après le *Moniteur de la photographie*, de M. L. Vidal, le résultat des expériences du docteur Miethe, de Berlin :

Il emploie le collodio-chlorure d'argent contenant un excès de nitrate. Il expose ce collodion à une forte lumière pendant plusieurs heures en l'agitant de temps en temps. Il se forme ainsi un précipité brun. Après avoir décanté la portion claire, il en enduit du papier. Le papier ainsi préparé reproduit les couleurs assez rapidement. La fixation s'opère avec le chlorure de magnésium en solution aqueuse à laquelle il ajoute 3 pour cent d'alun. Au bout de quelque temps, cependant, les couleurs pâlissent. Pour obtenir,

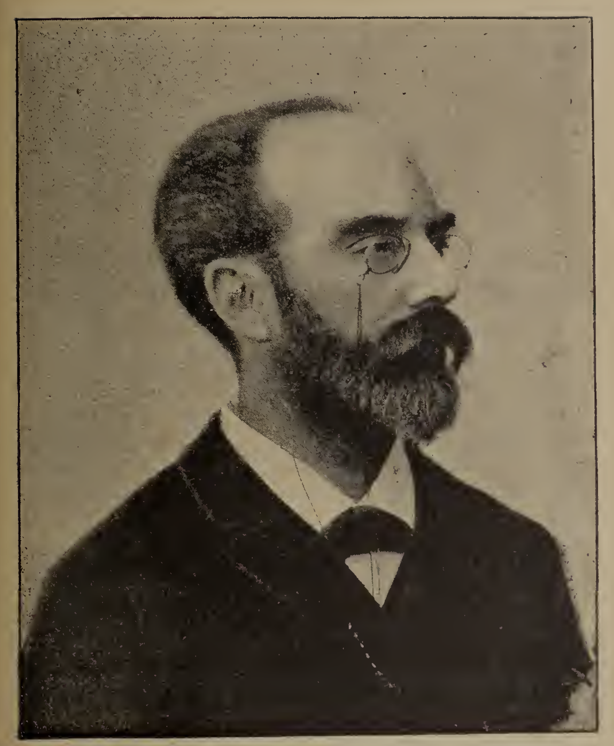
dit-il, des résultats satisfaisants, il est nécessaire d'éliminer les rayons ultra-violets au moyen d'un écran spécial. L'auteur se sert, à cet effet, d'une plaque de verre enduite du composé suivant : gélatine, 2 grammes ; glycérine, 2 grammes ; eau, 25 centimètres cubes, et esculine (principe fluorescent de l'écorce du marronnier d'Inde), 0,05 grammes. En associant cette plaque avec une seconde, préparée de la même manière, mais contenant 0,02 grammes de flurescine (principe fluorescent obtenu du goudron) à la place de l'esculine, l'absorption des rayons ultra-violets est presque complète.

## III

### Historique (*Fin*). — La découverte de M. Lippmann

Méthode interférentielle de M. Lippmann. — Perfectionnements des frères Lumière. — Expériences de Valenta. — Recherches postérieures à la découverte de M. Lippmann.

Tandis que de nombreux expérimentateurs faisaient d'infructueux essais pour obtenir la fixation photographique des couleurs, un savant français, à qui la science était déjà redevable de belles découvertes, M. G. Lippmann réfléchissait sur la question, et c'est ainsi qu'en 1889 il publia sa note à l'Académie des Sciences (voir ch. VII, page 195) sur l'emploi rationnel des écrans colorés en photographie isochromatique. Ayant été conduit aux mêmes déductions que Tillemann formulait déjà en 1863 (voir IVe partie, chapitre I), et s'appuyant sur ce que les couleurs sont le résultat d'un mouvement vibratoire, il chercha si,



PHOTOTYPE BOYER

M. LIPPMANN

dans les propriétés d'un tel mouvement, il ne serait pas possible de retrouver précisément celle qui produit sur notre rétine la sensation de couleur.

C'est le 2 février 1891, date désormais historique dans la science, que M. Gabriel Lippmann (1), après plusieurs années de recherches, montrait à l'Académie des Sciences la première image fixe du spectre solaire, ajoutant ainsi un fleuron de plus à la gloire française.

Déjà Arago, nous l'avons dit, croyait voir dans les colorations signalées par Niepce, « des effets où le phénomène des anneaux colorés jouait quelque rôle ».

(1) Né en 1845 à Hollerich, dans le Luxembourg, de parents français, M. Gabriel Lippmann entra, en 1867, à l'Ecole normale supérieure où il manifesta déjà une rare pénétration d'esprit et à la sortie de laquelle il fut envoyé en mission pour visiter les Universités allemandes. Il prit à Heidelberg le grade de docteur en philosophie et revint en France avec de superbes travaux qui le firent remarquer et nommer d'emblée maître de conférences de physique à la Sorbonne, où il fut admis dans le laboratoire de Jamin, auquel il succéda en 1884 comme directeur du laboratoire de recherches. M. G. Lippmann a été nommé chevalier de la Légion d'honneur en 1881, Membre de l'Institut en 1886 et officier de la Légion d'honneur en 1894. Nous publions un portrait de lui fort ressemblant, dû à M. Boyer, successeur de Van Bosch. Très modeste et très affable, M. Lippmann est un persévérant travailleur; que de fois l'avons-nous vu venir le dimanche à la Sorbonne où il était seul, ou à peu près, pour continuer ses recherches. Son cours de la Sorbonne, un des plus suivis et des plus goûtés, est caractérisé par l'originalité du maître et nous pouvons dire que nous en avons retiré chaque fois des idées nettes et suggestives.

En 1855, on lisait dans *La Lumière*, à propos des images colorées obtenues par Becquerel :

« M. Ross pensait qu'il se produisait dans les images » photochromatiques de M. E. Becquerel des teintes dues » aux lames minces telles que les montrent les bulles de » savon, les anneaux colorés, etc., et que les couleurs sont » dues à une épaisseur variable d'un composé qui se produi- » rait sous l'action de la lumière ».

Enfin, dans une communication de M. Carrère, faite en 1856 (*La Lumière*, page 90), sur les anneaux colorés, on peut lire :

« Si les différents points de la lame sont frappés par des » rayons simples différents, l'oxydation variera d'un point » à un autre de la lame, et, par conséquent, l'épaisseur de » la lame variera aussi et il pourra se faire que les couleurs » produites par la lame même en ses différents points, soient » identiques à celles des rayons qui l'ont frappée en ces » points. On pourra donc obtenir la photochromie, c'est-à- » dire la formation par la lumière des images des objets » avec leurs couleurs.

Becquerel lui-même écrivit à propos de son procédé les lignes suivantes :

« La lumière étant le résultat de vibrations transver- » sales des corps lumineux jusqu'à la rétine, et chaque » rayon du spectre correspondant à une vitesse de vibra- » tion différente, il peut se faire que la substance sensible » qui a été impressionnée par un rayon, c'est-à-dire par » des vibrations d'une certaine vitesse, ait acquis la faculté » de vibrer plus facilement ensuite sous l'action des vibra- » tions de même vitesse que celles de ce rayon. Ainsi il » se produirait dans cette circonstance le même phéno- » mène que celui qui se passe quand une réunion de sons

» vient frapper une corde tendue ; il n'y a que les sons
» de même hauteur que celui rendu par la corde qui mettent
» celle-ci en vibration. De même dans ces phénomènes, un
» faisceau de lumière diffuse qui vient frapper une image
» colorée produite par la lumière, renfermant une masse
» de vibrations différentes, chaque partie de l'image vibre-
» rait de préférence sous l'influence des rayons de même
» longueur d'onde que ceux qui ont agi pour la produire
» et alors les rayons réfléchis par les divers points de cette
» image se trouveraient identiques à ceux qui lui ont
» donné naissance. »

Il est curieux de constater que c'est précisément de la théorie des anneaux colorés que vint, au grand étonnement du monde photographique, la solution définitive de la chromophotographie.

Le procédé de M. Lippmann consiste à appliquer la couche sensible qui doit être transparente, sans grains et continue, contre un miroir plan métallique. Un faisceau lumineux qui tombe sur une telle plaque, traverse la couche sensible transparente, se réfléchit sur la surface polie et revient sur ses pas ; mais en revenant il rencontre le faisceau incident, en sorte qu'il y a dans l'intérieur de la couche sensible deux ondes : l'onde incidente et l'onde réfléchie ; ces ondes interfèrent et l'espace placé en avant du miroir comprend des plans parallèles alternativement brillants et obscurs, c'est-à-dire des ondes stationnaires. Si l'épaisseur de la couche sensible est de 1/20 de mm., cette couche peut contenir plus de 200 de ces plans comparables

aux feuillets d'un livre. Les plans brillants impressionnent seuls le sel sensible et sont remplacés après le développement par des lamelles minces d'argent réduit qui restent après le fixage et le séchage. La distance de deux de ces plans consécutifs constitue une lame mince d'épaisseur telle que les rayons réfléchis sur ses deux faces donnent en interférant entre eux la sensation de la couleur correspondante ; aussi, examinant la plaque fixée et séchée, donne-t-elle en chaque endroit la sensation même de la couleur qu'on avait fait tomber en cet endroit (1).

Monsieur Lippmann employait alors l'arc électrique comme source de lumière, et, comme couche sensible, du collodion, de l'albumine ou de la gélatine, sensibilisés au bain, en dissolvant par exemple de la gélatine dans une solution de bromure alcalin, l'étendant sur verre et la sensibilisant à l'azotate d'argent, comme on sensibilise le papier.

(1) Le 26 janvier 1891, M. Cornu signalait à l'Académie des Sciences (la séance précédant précisément la communication de M. Lippmann) un travail où M. Wiener produit dans une couche sensible semblable, ces mêmes phénomènes d'interférences donnant les lamelles d'argent qui jouent dans l'expérience Lippmann un rôle si important. Il avait en vue la vérification expérimentale directe de cette hypothèse de Fresnel, féconde jusqu'à être acceptée de tous, que la vibration de la lumière polarisée est perpendiculaire au plan de polarisation. Il est curieux de voir les idées du grand physicien-mathématicien recevoir ainsi coup sur coup une éclatante vérification et une merveilleuse application.

Il se servait, en outre, d'écrans colorés de manière à faire agir chaque radiation le temps qui lui était nécessaire pour impressionner la plaque qui avait été orthochromatisée.

Les images ainsi obtenues se voient très belles en appliquant la plaque qui les porte sur le mercure ou simplement sur du drap noir. L'intensité des couleurs est très satisfaisante ; elles sont remarquables par leur pureté ; le rouge a particulièrement une teinte très agréable, très franche et très vive (1).

Par transparence, plaçant la plaque entre l'œil et le ciel blanc, on voit, comme la théorie le prévoit d'ailleurs, un spectre où chaque couleur est complémentaire de celle qui apparaît au même endroit du spectre vu par réflexion. Mais ce spectre complémentaire n'a pas des couleurs si nettes que celles du premier : il est noyé dans une sorte de tache jaunâtre. Cette circonstance fâcheuse se retrouve, d'ailleurs, dans les anneaux colorés de Newton observés par transmission (2).

(1) A ce sujet l'un des auteurs de cet ouvrage, M. G.-H. Niewenglowski, à qui il avait été donné d'admirer ces merveilleux clichés peu de jours après la communication à l'Académie, écrivait : « La couleur rouge du spectre de » M. Lippmann, si agréable, si franche, si vive, ne ressemble » en rien à la teinte rouge que l'on voit sur les planches » coloriées représentant le spectre ».

(2) Une épreuve doit être spécialement préparée pour être observée par transparence ou par réflexion. L'une des

M. Lippmaun venait donc de doter la photographie de couleurs et de couleurs inconnues aux peintres, des couleurs les plus merveilleuses que nous montre la nature : couleurs des bulles de savon, des flammes, des nacres, des perles, des diamants, des pierreries les plus précieuses.

Mais la pratique était alors encore délicate, le temps de pose très long. La principale difficulté tenait au manque de sensibilité et d'orthochromatisme des plaques employées. M. Lippmann ne tarda pas à améliorer la couche sensible et, dès le mois de mai 1892, il présentait à l'Académie des Sciences des photographies très brillantes du spectre solaire obtenues sur des couches d'albumino-bromure d'argent, isochromatisées par l'azaline et la cyanine, sans écrans colorés, toutes les couleurs venant à la fois, après une pose comprise entre cinq et trente secondes.

Jusqu'alors, le spectre solaire seul avait été reproduit et, bien que la théorie indiquât le contraire, beaucoup de personnes, ignorant certainement les premiers principes de la théorie des ondulations, ne croyaient pas à la reproduction des couleurs complètes par cette si ingénieuse méthode. M. Lippmann

deux images doit être sacrifiée à l'éclat de l'autre ; on augmente la pose pour améliorer l'image transmise. On peut d'ailleurs renforcer ces épreuves par les mêmes procédés que les clichés ordinaires.

montra combien peu fondés étaient ces doutes en présentant à l'Académie, à la même séance de mai 1892, cinq clichés reproduisant : 1° *un trophée de drapeaux franco-russes ;* 2° *un vitrail en quatre couleurs* (*rouge, vert, bleu, jaune*) *;* 3° *une perruche ;* 4° *un plat d'oranges surmonté d'un pavot rouge ;* 5° *une feuille de houx garnie de ses petits fruits rouges ;* sur ce dernier cliché, on apercevait les moindres détails ainsi que les différences de nuances dans les diverses parties de la feuille.

La perruche et la feuille de houx avaient été obtenues à la *lumière diffuse ;* les autres phototypes étaient éclairés par le soleil.

Ces phototypes furent montrés tout d'abord à l'Académie des Sciences ; puis, le 6 mai suivant, à la Société française de Physique, et le 11 mai au Photo-Club de Paris. Tout le monde put les voir, avec ceux du spectre et celui de MM. A. et L. Lumière à l'Exposition internationale de Photographie du Champ-de-Mars (salle de l'Histoire de la Photographie).

Quelques mois après, en octobre 1892, M. Lippmann présentait à l'Académie des Sciences une note sur l'emploi des substances colloïdales bichromatées, comme surface sensible. Nous reproduisons cette note telle quelle :

« On sait qu'une couche sèche d'albumine ou de gélatine
» bichromatée est modifiée par la lumière : la matière orga-
» nique devient moins hygrométrique.

» La plupart des procédés d'impression photomécanique » employés dans l'industrie sont fondés sur cette action de » la lumière.

» Une couche d'albumine (ou de gélatine) bichromatée, » coulée et séchée sur verre, est exposée à la chambre noire, » adossée à un miroir de mercure. Il suffit ensuite de la » mettre dans l'eau pure, pour voir apparaître les couleurs ; » ce lavage à l'eau pure, en enlevant le bichromate, fixe » l'épreuve en même temps qu'il la développe. L'image » disparaît quand on sèche la plaque, pour reparaître chaque » fois qu'on la mouille de nouveau.

» Les couleurs sont très brillantes ; on les voit sous toutes » les incidences, c'est-à-dire en dehors de l'incidence de la » réflexion régulière.

» En regardant la plaque par transparence, on voit nette- « ment les complémentaires des couleurs vues par réflexion.

» La gélatine bichromatée se comporte de même, sauf que » les couleurs apparaissent à leur place, non quand la plaque » est mouillée en plein, mais quand on la rend légèrement » humide en soufflant à sa surface.

» La théorie de l'expérience est facile à faire Comme dans » le cas des couches sensibles contenant un sel d'argent, le » miroir de mercure donne lieu, pendant la pose, à une » série de maxima et de minima d'interférences. Les maxima » seuls impressionnent la couche, qui prend, par suite, une » structure lamellaire et se divise en couches alternati- » vement gonflables et non gonflables par l'eau.

» Tant que la plaque est sèche, on n'aperçoit pas d'images ; » mais dès que l'eau intervient, les parties de la couche non » impressionnées s'en imbibent. L'indice de réfraction varie » dès lors périodiquement, dans l'épaisseur de la couche, de » même que le pouvoir réflecteur, et l'image colorée devient » visible (1).

(1) Lorsqu'on emploie l'albumine, il faut étendre une couche de ce liquide sur verre, le faire sécher et de plus, le coaguler par du bichlorure de mercure avant de le plonger dans le bichromate de potasse; sans cette précaution, l'albumine non impressionnée se dissoudrait lors du lavage à l'eau pure. On peut passer au bichlorure de mercure soit avant, soit après que la plaque a reçu l'impression lumineuse.

L'année suivante, en 1893, à la séance du 7 avril de l'Académie des Sciences, M. Lippmann a présenté des phototypes colorés exécutés, au moyen de sa méthode interférentielle, par les frères Lumière sur des plaques au gélatino-bromure, transparentes, isochromatiques, préparées par eux.

Ces phototypes représentaient : *un spectre solaire de grandes dimensions ; un paysage sur crépon japonais ; un bouquet de fleurs artificielles ; un disque de Newton en verres colorés ; plusieurs chromolithographies*. On remarquait notamment sur ces chromophotographies, que les blancs étaient rendus fidèlement avec leurs nuances diverses et leur éclat. Ces blancs ne sont visibles, comme les autres couleurs, que sous l'angle de la réflexion régulière : par diffusion, on ne voit, à l'endroit où ils sont marqués, que la couleur brun foncé du précipité photographique.

Comme on le voit, jusqu'à ce jour, la chromophotographie n'avait reproduit que des natures mortes. Mais elle ne tarda pas à reproduire la nature vivante :

En effet, le 11 mai 1893, MM. Lumière ont fait présenter au Photo-Club de Paris, par M. A. Berget, une nouvelle série de phototypes colorés, renfermant cette fois des paysages.

Nous extrayons du journal *Le Temps* le compte-rendu de cette séance.

« Un vrai régal pour les yeux, hier soir, au siège de la Société du Photo-Club de Paris, où M. Berget, attaché au laboratoire des recherches physiques de la Sorbonne, présentait des clichés de paysage en couleur obtenus par MM. Lumière, d'après la méthode de M. Lippmann. MM. Lumière, après de longues recherches, ont réussi à préparer des plaques de gélatino-bromure susceptibles de se conserver pendant un temps assez long, et, le grain en étant assez fin pour permettre la reproduction des couleurs, il nous a été donné de voir les merveilleux résultats auxquels ils sont arrivés.

Ce sont vraiment des aquarelles que nous avons pu admirer dans ces clichés. Voici un bouquet : roses, violettes, jasmins nous sont apparus avec leurs couleurs vraies, réelles; avec leur délicatesse infinie de tons si multiples et si variés. Tout y est, le vert et le blanc, le bleu et le rouge, et le rose et le violet avec leur souplesse, leur velouté, tout y est rendu... fors l'odeur. Voilà maintenant un coin de parc avec un ciel d'un bleu exact, avec des allées sablées que l'on distingue avec une netteté parfaite, de la terre remuée des pelouses ; voici encore un petit cottage ravissant, une maisonnette tout ensoleillée — et de quel soleil ! — un sous-bois fait de verts sombres et clairs, avec des éclaircies délicieusement réparties, le tout donnant la sensation même de la nature.

Nous arrivons à la reproduction d'une série de chromolithographies dont les couleurs crues nous sont bien connues pour les avoir rencontrées, journellement, sur les boîtes d'allumettes-bougies. C'est le maréchal Soult — ou soi-disant tel — qui nous est présenté avec sa « frégate » empanachée d'un blanc superbe, « ce blanc dont la reproduction est le comble de la photographie des couleurs, » nous dit M. Berget. Ce sont des caricatures, ce sont des affiches que nous avons vues maintes fois sur les murs, qui nous sont offertes et dont nous reconnaissons bien, sous les projections oxhydriques, les tonalités familières à nos yeux ; c'est aussi un écran japonais avec le coloris exotique que l'on constate dans ce genre de peinture.

M. Berget nous a donné, à ce sujet, les explications suivantes :

« La photographie des couleurs vient de faire certaine- » ment un grand pas. Le problème de l'isochromatisme est » aujourd'hui résolu ; car nous avons maintenant des glaces » également sensibles à toutes les couleurs : voyez les bleus » et les blancs des paysages qui viennent de nous être » montrés ; dans les photographies ordinaires le ciel est, » comme vous savez, d'un blanc cru, on dit qu'il est sola- » risé ; dans les épreuves nouvelles, les ciels sont venus » avec leurs bleus justes. Quant au blanc qui est la résul- » tante de toutes les couleurs simples, il est admirablement » reproduit par les glaces nouvelles, qui sont sensibles à » toutes les couleurs simples.

» Il faut dire, cependant, qu'il reste à accélérer le temps » de pose, qui est encore de vingt-cinq à trente minutes, » alors qu'il dépassait d'abord, il est vrai, plus d'une heure. » Il serait, en effet, assez difficile de trouver une personne » assez complaisante ou assez désireuse d'avoir sa photo- » graphie en couleurs, pour rester une demi-heure durant » immobile en plein soleil.

» Un autre *desideratum* est aussi à formuler : chaque » épreuve est unique, et il en était de même jadis pour les » daguerréotypes ; il faudrait donc pouvoir tirer les épreu- » ves sur papier ».

Peu de temps après, la même année, M. Lippmann a projeté, à la séance du 3 novembre de la Société française de physique, les superbes phototypes colorés de paysages et de portraits obtenus par MM. Lumière, au moyen de sa méthode interférentielle. Outre les paysages, on y a remarqué le portrait d'un officier : le drap rouge du képi, les galons d'or sont rendus avec une remarquable fidélité. Dans un portrait de jeune

fille endormie, les ombres sont bien celles qu'on observe en plein air.

Cependant, quelques personnes eurent de la peine à croire à la vérité de cette découverte ; quelques-unes avouèrent n'être ni « sceptiques, ni croyantes. » Parmi les sceptiques nous avons le regret de compter M. Ives, l'inventeur du fameux héliochromoscope, qui prétendait que seul son appareil reproduisait les couleurs naturelles des corps et que les journalistes qui avaient parlé de la découverte de M. Lippmann avaient essayé « de jeter de la poudre aux yeux des simples mortels. » La vivacité de polémiques engagées à la suite de sa lettre dépassa peut-être le domaine d'une critique purement scientifique.

Un grand nombre de personnes ont, depuis, répété l'expérience de M. Lippmann, avec succès, en particulier M. Valenta à l'étranger, M. Contamine (de Lille), en France ; dans le chapitre relatif à la pratique du procédé nous donnerons à ce sujet quelques détails que nous devons à l'obligeance du second et publierons la formule d'émulsion recommandée par le premier.

Depuis la découverte de M. Lippmann un grand nombre de procédés ont été proposés ; tel est celui du docteur Raphaël Kopp, décrit ainsi dans les revues photographiques de 1892 :

« Du papier est mis à flotter deux minutes sur une solution à 10 °/₀ de chlorure de sodium, séché et plongé dans

un bain de nitrate d'argent à 8 °/o, repassé dans le bain de sel, et lavé pendant 12 heures.

On le plonge en pleine lumière, le côté préparé en dessus, dans la solution suivante :

| | | |
|---|---|---|
| (1) | Chlorure de zinc . . . . . . | $0,^{g}15$ |
| | Acide sulfurique . . . . . . | 2 gouttes |
| | Eau . . . . . . . . . . . . . | $150^{cc}$ |

Le papier, devenu bleu-verdâtre, est enlevé, séché, et se conserve bien.

On prépare ensuite la dissolution :

| | | |
|---|---|---|
| (2) | Bichromate de potasse. . . . | $15^{g}$ |
| | Sulfate de cuivre pur . . . . | $15^{g}$ |
| | Eau . . . . . . . . . . . . . . | $100^{cc}$ |

On broie 15 g. de nitrate mercureux ; on dissout dans le moins d'eau acidulée (par l'acide nitrique) possible ; la solution (2) étant portée à l'ébullition, on y verse le nitrate. On cesse de chauffer pour laisser le précipité rouge se déposer et refroidir, on filtre, on ramène à $100^{cc}$. Ce liquide se conserve bien.

Le papier au chlorure plongé dedans est laissé une demi-heure en remuant constamment, on fait de même dans une solution de chlorure de zinc à 3 °/o jusqu'à réapparition de la couleur bleue.

On lave, on sèche, et on replonge pendant 6 minutes dans le bain de mercure. On enlève, on essuie grossièrement dans un buvard, et expose encore humide. Le jaune et le vert viennent bien immédiatement, les autres teintes (le blanc aussi) sont voilées. On protège le jaune et le vert par un vernis et on plonge dans une solution à 2 °/o d'acide sulfurique, on agite jusqu'à disparition du voile, on lave, on sèche. Pour terminer, on repasse l'épreuve dans un bain de nitrate et ensuite dans celui d'acide sulfurique pour activer les couleurs.

On sèche, on recouvre d'une solution de gomme arabique contenant 5 °/o d'acide sulfurique, on sèche une dernière fois et on vernit.

Tel est encore le procédé suivant, dû à M. Hollis, en 1893 :

On prend une plaque de verre ou d'une autre substance, couverte d'une couche de sulfure de calcaire phosphorescent ; on l'expose à la chambre noire, et on obtient une espèce de négatif phosphorescent.

D'après M. Hollis, ce négatif peut impressionner par contact une plaque sensible et l'épreuve obtenue montre après développement des signes visibles de coloration.

M. de Saint Florent reprit, en 1892, ses recherches et écrivit la lettre suivante à ce sujet à la Société française de photographie :

Limoges, le 19 novembre 1892.

« Monsieur,

» Comme suite à ma lettre du 17, j'ai l'honneur de vous faire connaître que je suis arrivé à produire des épreuves en couleur au moyen des sels de fer au maximum.

» J'emploie tout simplement le bain indiqué, il y a bien longtemps, par Poitevin :

| | |
|---|---|
| Eau. . . . . . . . . . . | 100 |
| Perchlorure de fer . . | 10 |
| Acide tartrique. . . . | 5 |

» Comme je n'avais pas de plaques à la gélatine simple, j'ai pris des plaques au gélatinobromure, dont j'ai enlevé le sel haloïde d'argent au moyen de l'hyposulfite.

» Après des lavages soignés et un séchage complet, la plaque, dont la gélatine est devenue insoluble, est exposée derrière un verre colorié pendant un temps assez long. Après l'exposition, on lave à l'eau tiède ; les parties insolées sont devenues plus ou moins solubles et l'on obtient une épreuve qu'il faut sécher rapidement devant le feu.

» Lorsque *l'image est sèche*, elle présente des couleurs

légères, parmi lesquelles le rouge, le jaune et le vert. Les violets et les bleus sont à peine visibles.

» Ces couleurs ne se voient pas *sous toutes les incidences* ; il faut les observer dans les mêmes conditions que dans les premières expériences de M. Lippmann.

» J'ai également obtenu des images en couleurs avec la gélatine bichromatée appliquée sur verre. On développe à *l'eau chaude* ; les couleurs se montrent comme dans l'expérience ci-dessus.

» Il me paraît certain qu'avec un miroir de mercure, les résultats doivent être infiniment meilleurs ».

Enfin, en 1894, M. Cousin a présenté à la Société française de photographie sept épreuves en couleurs dues à M. Pons, décédé en mai 1894. Elles ont été obtenues sur papier au chlorure d'argent rouge ou violet plus ou moins modifié ; mais on ne connaît pas les détails du procédé.

Un concours a été ouvert par la Société française pour l'obtention de chromophotographies par le procédé Lippmann. Les résultats n'en sont pas encore annoncés.

La même année que la découverte de Lippmann on fit beaucoup de bruit autour d'une mystérieuse découverte faite par un M. Baudran, de Versailles, qui prétendait voir sur un cliché quelconque les couleurs du modèle et les en faire sortir à volonté. Il est de fait qu'examinant sous une certaine incidence un daguerréotype il se colore, les chairs particulièrement. C'est ce fait, dû à un simple phénomène de diffraction que M. Baudran a reproduit en adaptant une chambre 13/18 munie de son objectif contre la cloison percée d'une

pièce obscure (fig. 86). Sur une planche horizontale placée à l'extérieur il installe verticalement une photocopie sur papier albuminé et l'éclaire par trois miroirs mobiles placés, l'un au-dessus de l'ouverture de la cloison, les deux autres verticalement sur les

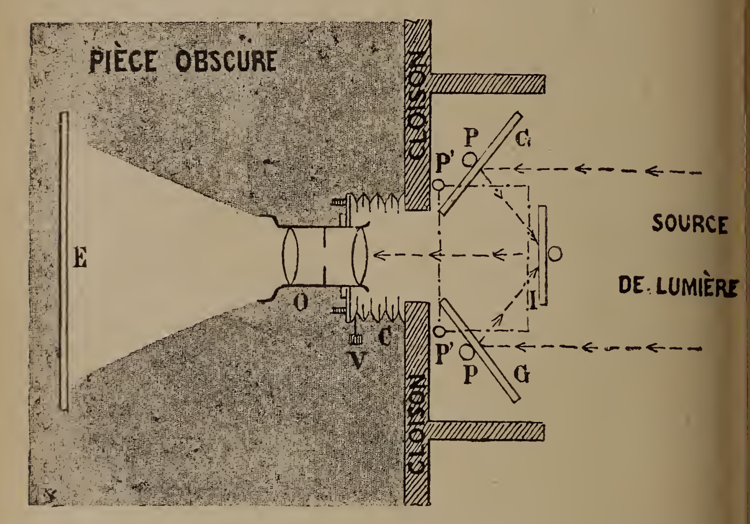



Fig. 86. — C, chambre noire ; V, crémaillère pour la mise au point ; E, écran récepteur de l'image ; G, miroirs ; I, épreuve à projeter ; O, objectifs à portraits ; P, pivots des miroirs ; P'P', pivots de la 3e glace représentée en traits discontinus.

côtés. Un écran blanc reçoit l'image agrandie qui ne tarde pas à se colorer faiblement. Comme on le voit les couleurs ne sont autres que des couleurs obtenues par interférence, et M. Baudran n'a fait que répéter là l'expérience des trois miroirs de Fresnel.

## IV

### Théorie du procédé Lippmann

Comparaison avec les bulles de savon. — Stratification de la couche sensible. — Enregistrement de la vibration lumineuse. — Analogie avec le phonographe. — Causes de l'insuccès des recherches antérieures.

La théorie de l'expérience de M. Lippmann est très facile à comprendre quand on connaît la théorie de ces belles colorations que présentent certaines coquilles d'huîtres, certaines nacres que les Orientaux savent si bien incruster dans leurs laques inimitables. Ces coquilles ne sont pas colorées par elles-mêmes; leurs reflets changeants ne ressemblent en rien aux teintes ordinaires; en certains points la coquille est colorée, en outre les nuances varient avec l'angle dans lequel on les regarde et avec la lumière incidente. D'ailleurs des substances incolores réduites en lames suffisamment minces se teintent également de vives couleurs. Tel est le cas des bulles de savon formées avec un liquide incolore; une couche d'huile très mince étalée à la surface de l'eau présente des irisations multiples; une lame d'acier polie, échauffée, se recouvre d'une légère couche d'oxyde, dont la couleur varie du rouge au bleu suivant l'épaisseur de cette couche;

cette propriété sert d'ailleurs dans l'industrie à arrêter le recuit au moment voulu. La couleur que prend une lame mince dépend, en effet, de son épaisseur ; au fur et à mesure qu'elle diminue, on observe successivement par réflexion du rouge, puis du vert, du bleu et enfin du violet ; chaque épaisseur correspond à une couleur bien déterminée.

La lumière du jour qui a traversé une telle lame mince allant se réfléchir sur la surface sous-jacente, l'onde réfléchie interfère avec l'onde incidente et ce sont ces interférences qui donnent lieu à ces colorations étudiées par Newton, et expliquées par la belle théorie des ondulations de Fresnel, pour qui la lumière est un mouvement vibratoire se propageant dans un milieu hypothétique, très élastique, peu dense et répandu partout, l'éther, comme l'appellent les physiciens.

Les vibrations lumineuses s'exécutent dans des temps différents pour les diverses couleurs, comme il advient des vibrations sonores pour les divers sons de la gamme ; l'espace parcouru par le mouvement vibratoire pendant la durée d'une vibration est la longueur d'onde, qui varie avec chaque couleur, augmentant du violet au rouge pour les couleurs du spectre : *violet*, *indigo*, *bleu*, *vert*, *jaune*, *orangé*, *rouge*. On démontre (optique physique) que la couleur renvoyée par une lame mince est précisément celle dont la demi-longueur d'onde est égale à l'épaisseur de la lame.

Les coquilles d'huîtres, la nacre sont faites de lamelles

superposées les unes aux autres, au fur et à mesure de leur production et laissant entre elles des intervalles occupés par de l'eau ou de l'air. L'épaisseur de ces lamelles aussi bien que de ces intervalles est extrêmement faible, on les compte par milliers dans un millimètre.

La nacre paraît jaune en les points où les feuillets qui la forment sont espacés à la distance de 0 millimètre, 00025, demi longueur d'onde du jaune ; il y a alors 4000 de ces lamelles dans un millimètre d'épaisseur ; elle paraît rouge là où il n'y a que 3120 feuillets par millimètre, violette où il y en a 5000.

Dans l'expérience de M. Lippmann, il s'est produit, dans la couche sensible, une série de lames minces : « le » dépôt d'argent réduit est stratifié (1) ; il se compose » d'une série de lames minces d'argent équidistantes » partageant la gélatine ou l'albumine qui leur sert de » support en lames minces superposées. Là où on voit » par exemple du rouge, la distance entre deux dépôts » d'argent, ou, en d'autres termes, l'épaisseur de la » couche de gélatine qui les sépare, est égale à la demi » longueur d'onde du rouge. Chacune de ces lames » minces agit donc comme une bulle de savon capable

(1) Voir Lippmann. — La Photographie des couleurs. — Conférences publiques sur la photographie, organisées au Conservatoire national des arts et métiers. — Paris, Gauthier-Villars, 1893.

» de réfléchir du rouge... De même, si plus loin on » aperçoit du vert, » c'est qu'en cet endroit la stratification est plus serrée » et que les lames » minces n'ont plus » pour épaisseur que » la demi-longueur » d'onde du vert. Et » de même pour les » autres parties du » spectre. La figure 87 » représente schématiquement le dépôt » photographique » partagé en lames » minces, d'épaisseur » décroissante du rouge au violet.

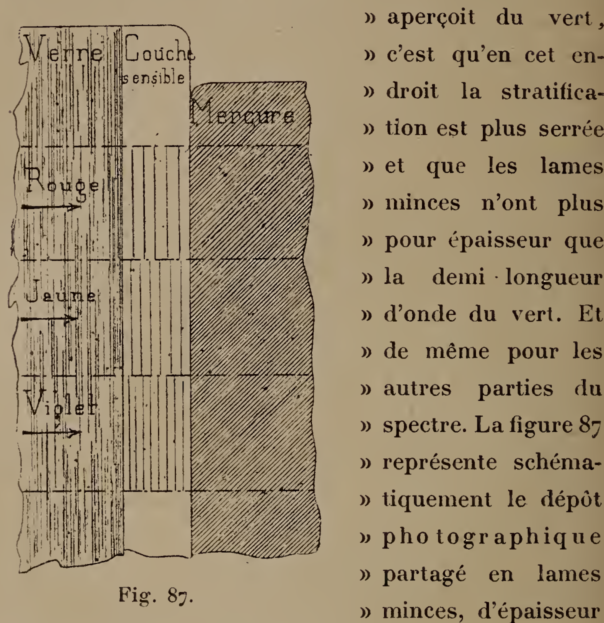



Fig. 87.

» Il faut remarquer qu'il est impossible de représenter par une figure l'épaisseur vraie de ces dépôts. » En effet, l'épaisseur de chaque lame, ou la demi-» longueur d'onde est :

Pour le rouge . . . . . $\frac{1}{3300}$

Pour le jaune . . . . . $\frac{1}{4000}$

Pour le violet . . . . . $\frac{1}{5000}$

» En d'autres termes, supposons que la couche de » gélatine sensible ait l'épaisseur d'une feuille de papier » ordinaire, ou de $\frac{1}{10}$ de millimètre. Cette couche, » après l'action photographique se trouvera partagée :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Dans | le | rouge | en | 330 | lames | minces |
| » | » | jaune | » | 400 | » | » |
| » | » | violet | » | 500 | » | » |

L'éclat de la couleur observée tient au grand nombre de lames minces superposées ; car leurs effets s'ajoutent.

Et maintenant pourquoi la plaque sensible présente-t-elle un dépôt ainsi formé ? Le dépôt est stratifié parce que la lumière qui a impressionné la couche était elle-même stratifiée pendant la durée de la pose dans la chambre noire. Et cette stratification est due à la présence du miroir de mercure (fig. 88). Si la face A de la plaque reçoit normalement un rayon lumineux de couleur homogène, ce rayon traverse la couche sensible transparente, se réfléchit sur la surface du mercure qui le renvoie sur lui-même; il en résulte, entre le rayon incident et le rayon réfléchi, cette sorte de conflit auquel on a donné le nom d'inter-

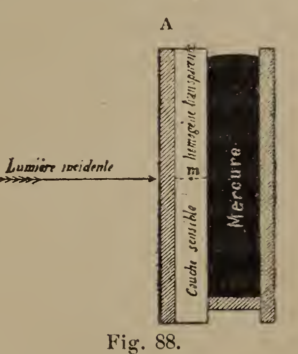


Fig. 88.

férence, de sorte qu'une molécule m de la couche sensible reçoit simultanément l'action de l'onde réfléchie et de l'onde incidente. Or, en certains points ces actions s'ajoutent et il y a, en ces points, des maxima lumineux; en d'autres points les actions se retranchent au contraire et s'annulent. Si, au lieu d'un seul rayon, on considère un faisceau de lumière homogène tombant sur le miroir, l'ensemble des points où il y a maxima lumineux forme une série de plans parallèles à la surface des miroirs ; ce sont les plans ventraux où se forment les couches d'argent réduits. Aux points de minima lumineux correspondent des plans nodaux, parallèles aussi au miroir, mais en ces plans l'action photographique étant nulle, il ne reste, après développement et fixage, que la gélatine pure.

« En définitive, on voit que l'action photographique
» n'a fait que fixer, en la remplaçant par un dépôt
» d'argent la position de chaque maximum d'action
» lumineuse. Or, ces maxima d'action lumineuse sont
» séparés par des distances égales à une demi-longueur
» d'onde de la lumière employée; c'est pourquoi les
» lames mêmes obtenues ont précisément cette épais-
» seur. La vibration lumineuse s'est, en quelque sorte,
» moulée par une photographie, dans l'épaisseur de la
» lame impressionnée. »

La théorie précédente (1) est celle qui a guidé M.

(1) A la séance du 4 janvier 1895 de la Société française de physique, M. Guillaume a indiqué une analogie acous-

Lippmann; le succès même de l'expérience l'a démontrée. D'autres vérifications expérimentales peuvent être faites. D'abord, comme dans le cas d'une bulle de savon, d'une coquille d'huître, etc., quand on regarde une chromo-photographie du spectre, sous une incidence de plus en plus rasante, on voit les couleurs changer : le vert prend la place du rouge, le bleu celle du vert, le violet celle du bleu, l'ultra-violet qui est visible, celle du violet (1).

tique de l'expérience de M. Lippmann. — Lorsqu'on produit un choc, en frappant sur le sol ou dans ses mains au voisinage d'une balustrade ou d'une palissade, on entend un son cinglant et prolongé, qui s'explique par des réflexions sur les barreaux de la balustrade. Les chocs qu'ils renvoient à l'oreille se succèdent à des intervalles de temps correspondant à un son dont la longueur d'onde est sensiblement double de la distance des barreaux.

(1) Le changement de couleur avec l'incidence permet de mettre en doute un fait qui a été souvent rapproché de l'expérience de M. Lippmann. Certains daguerréotypes présentent des colorations qu'on dirait naturelles; quelques-uns en profitaient même pour dire que M. Lippmann n'avait rien trouvé, que son expérience était aussi vieille que la découverte de la photographie. Nous leur répondrons que, même si M. Lippmann n'était pas le premier à avoir obtenu directement des couleurs sur le cliché, il serait du moins le premier qui en ait donné la théorie, et la simplicité de cette théorie suffit pour faire honneur à son inventeur. Nous leur dirons en outre que la coloration de ces daguerréotypes ne variant pas avec l'incidence sous laquelle on les regarde, il est même possible que ces couleurs aient été parfois rajoutées artificiellement, contrairement à ce que croient beaucoup de personnes. D'ailleurs M. Lippmann a trouvé dans de vieux ouvrages des brevets relatifs à la coloration arti-

Une seconde vérification est la suivante : si l'on regarde normalement une épreuve colorée du spectre et si on la mouille en promenant par exemple dessus le doigt imprégné d'eau, la couche de gélatine ou d'albumine se gonfle ; l'épaisseur des lames minces augmentant considérablement, toutes les couleurs disparaissent ; leur épaisseur correspond alors aux demi-longueurs d'onde comprises dans l'infra-rouge et au-delà, radiations invisibles à l'œil. Inversement, pendant la dessiccation l'épaisseur redevient ce qu'elle était primitivement, et les couleurs réapparaissent ; le rouge rentre en tête par l'extrémité primitivement violette traversant toute la longueur du cliché pour aller reprendre sa place ; le jaune marche derrière lui, suivi du vert et ainsi de suite jusqu'au violet, ce mouvement apparent ne cessant que quand toutes les couleurs sont revenues à leur place.

Le principe de l'expérience de M. Gabriel Lippmann a une grande analogie avec celui du phonographe d'Edison. « Dans les deux cas, la vibration *sonore* ou **lumineuse** laisse sa trace sur une substance impressionnable, *étain* ou **gélatine**, et le cliché qu'elle a confectionné redonne fidèlement les vibrations, *son* ou **lumière**, qui l'ont produit, avec tous leurs caractères et en particulier leur *tonalité* ou **couleur** ».

Ces quelques lignes suffisent pour faire concevoir

ficielle des daguerréotypes au moyen de poudres colorées très fines. Pour lever complètement le doute il suffira d'examiner au microscope quelques-uns de ces daguerréotypes.

que si le phonographe peut reproduire les sons composés, de même le procédé de M. Lippmann peut reproduire les couleurs composées. C'est ce que l'expérience a montré, nous l'avons vu, et ce que la théorie prévoyait. Nous n'entrerons pas dans les détails de cette théorie, renvoyant à la belle et savante communication faite à ce sujet par M. Lippmann à la séance du 15 janvier 1894 de l'Académie des sciences; il a surtout insisté sur ce fait que le phénomène est plus compliqué quand il s'agit d'une lumière blanche que quand on a affaire à une lumière homogène.

Aussi la couleur blanche est-elle la plus difficile à reproduire, le blanc étant la synthèse de toutes les couleurs; mais si le blanc est reproduit, toutes les autres couleurs le seront avec leurs vraies valeurs.

La théorie de l'expérience de M. Lippmann montre bien la cause de l'insuccès des recherches antérieures. Ainsi les couleurs sur les épreuves colorées de M. Becquerel semblent s'être formées de la même manière; seulement, si on cherche à fixer la plaque dans l'hyposulfite, les parties comprises entre les feuillets d'argent réduit se dissolvent, et comme ces parties constituent le seul support qui maintient les plans réfléchissants à la distance d'une demi-longueur d'onde, ce support vient à manquer, et les plans réfléchissants s'effondrent les uns sur les autres : toute coloration disparaît.

Si, d'autre part, on cherche a examiner la plaque

non fixée, à la lumière du jour, celle-ci agit sur les parties encore sensibles situées entre les feuillets et les impressionne à leur tour : l'image disparaît dans la masse entièrement altérée.

Dans l'expérience de M. Lippmann, au contraire, la couche sensible est impressionnée dans la masse d'une matière transparente, collodion, albumine ou gélatine, qui sert de support et sur laquelle l'hyposulfite est sans action ; ce fixatif dissout seulement le bromure non altéré, emprisonné dans cette couche, et celle-ci constitue, pour l'édifice des feuillets réfléchissants, une charpente qui maintient invariable la distance qui les sépare.

Tout dernièrement, à la séance du 21 décembre 1894 de la Société française de physique, M. G. Lippmann a prouvé une fois de plus irréfutablement que sa méthode chromophotographique est bien réellement due à la production des ondes stationnaires. Il a en effet, grâce à elle, répété sous une forme démonstrative et beaucoup plus simple, l'expérience fondamentale d'Otto Wiener sur l'interférence de deux ondes lumineuses polarisées rectilignement, se croisant à angle droit. Il fait tomber sur une couche sensible continue, sans grain, d'épaisseur ordinaire, un faisceau parallèle de lumière sous une incidence de 45°. Pour cela, la plaque est fixée, la couche sensible à l'extérieur, sur la face hypothénuse d'un prisme rectangle isocèle, l'intervalle entre le prisme et la lame étant rempli par de la benzine. Le faisceau lumineux, tombant normalement sur la face d'entrée du prisme, subit la réflexion totale sur la face externe de la couche sans qu'il soit besoin d'un miroir de mercure. Comme dans l'expérience de Wiener, les faisceaux incidents et réfléchis interfèrent, mais cette fois le faisceau n'est pas monochromatique ; on a le spectre

complet. En outre, il a été préalablement polarisé en traversant un prisme biréfringent, de sorte que la plaque sensible reçoit deux spectres, côte à côte, l'un provenant du faisceau dont les vibrations sont normales au plan d'incidence, l'autre de celui dont les vibrations sont dans le plan d'incidence. Les premières vibrations seules étant capables d'interférer sont seules capables de donner une photographie colorée du spectre ; après développement et fixage, un seul spectre est coloré et c'est bien celui provenant du faisceau polarisé dans le plan d'incidence, conformément aux idées de Fresnel.

Si au contraire on répète l'expérience avec le papier Poitevin préparé avec le même sous-chlorure violet dont se servait Becquerel, les deux spectres sont colorés et leur variation d'intensité avec l'incidence ainsi que leur aspect par transparence, diffèrent totalement de ce qu'on observe avec les spectres obtenus par la méthode Lippmann. Il est donc plus que probable qu'ils ne sont pas dus à des phénomènes d'interférence.

Enfin cette expérience de M. Lippmann montre combien Wiener s'était approché de la solution de la photographie des couleurs qu'il n'a pas obtenue parce que, grâce à son habileté même, il avait réussi à préparer des couches sensibles extrêmement minces.

## NOTE

Nous extrayons de l'année 1893 du journal *La Photographie*, un aperçu de la théorie mathématique de l'expérience Lippmann, rédigé par M. G. Sagnac, agrégé de physique, d'après une communication de M. G. Lippmann à la Société française de physique :

On a une première approximation pour la théorie des plaques de M. Gabriel Lippmann en faisant abstraction de l'absorption de la lumière par la substance de la plaque.

On va, dans cette hypothèse, étudier la composition de la lumière réfléchie par la plaque, prouver que les différentes régions de la plaque réfléchissent uniquement les couleurs qui les ont impressionnées, et les réfléchissent dans les rapports mêmes suivant lesquels elles entraient dans la lumière impressionnante qui a produit le dépôt d'argent.

*Photographie des couleurs simples du spectre solaire.* — Tout se ramène au cas suivant :

Considérons une région de la plaque qui n'ait été impressionnée que par une lumière monochromatique de d'onde $\lambda$. Quelle est la nature de la lumière réfléchie par la plaque exposée à la lumière blanche ?

L'action de la lumière $\lambda$ a produit, en définitive, une distribution périodique des particules d'argent. On sait, par les expériences de M. O. Wiener, que l'action chimique de la lumière est minimum sur le plan du miroir et sur tous les plans qui en sont distants d'un nombre pair de quarts de longueurs d'onde (plans nodaux), maximum sur les plans qui en sont distants d'un nombre impair de quarts de longueurs d'onde (plans ventraux).

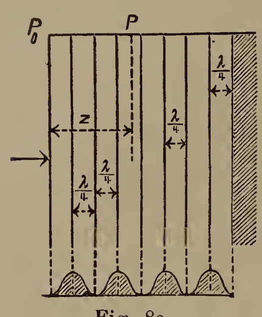


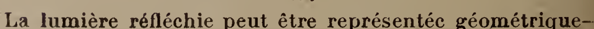
Fig. 89.

Quelle que soit la relation qui existe entre le pouvoir réflecteur du dépôt d'argent sur un certain plan P, parallèle au miroir de mercure, et l'action chimique de la lumière qui l'a produit, le pouvoir réflecteur du dépôt sur un plan P distant de $z$, du plan origine $P_0$, sera comme l'intensité de l'action chimique, une fonction de $z$, $K(z)$, se reproduisant périodiquement chaque fois que $z$ croît de $\frac{\lambda}{2}$, maximum sur les plans ventraux, nulle sur les plans nodaux. Telle est la structure de la plaque impressionnée par la lumière simple A.

Fig. 90.

Éclairons-la avec de la lumière blanche.

Considérons dans cette lumière blanche une couleur simple quelconque $\lambda'$, et n'envisageons pour le moment que l'action de la plaque sur la lumière éclairante $\lambda'$.


La lumière réfléchie peut être représentée géométrique-

ment : il suffit d'appliquer la règle de Fresnel aux vibrations composantes réfléchies par les différentes couches de la plaque,

Sur un plan P distant de $z$ du plan $P_0$, la lumière se réfléchit proportionnellement au pouvoir réflecteur $K(z)$ relatif au plan P, puis retraverse $P_0$ après avoir parcouru le chemin $2z$. Si nous supposons les $\lambda$ relatifs à un certain indice moyen de la plaque, $\frac{2z}{\lambda'}$ est la perte de phase résultant du chemin parcouru $2z$, la phase de la vibration réfléchie en $P_0$ étant prise pour origine. Si on laisse de côté pour le moment les retards par réflexion, on aura :

$$\alpha = 2\pi \frac{2z}{\lambda'}$$

pour l'angle de continence de la courbe de Cornu.

D'ailleurs, l'arc de cette courbe a pour élément :

$$ds = K(z)\ dz,$$

puisque l'on est convenu de représenter par $K(z)\ dz$ l'amplitude de la vibration réfléchie par l'épaisseur $dz$ à la distance $z$ de $P_0$.

Le rayon de courbure de la courbe de Cornu est donc :

$$R = \frac{ds}{d\alpha} = \frac{Kdz}{\frac{4\pi}{\lambda'}dz} = \frac{K\lambda'}{4\pi}$$

Si K était constant, le rayon de courbure R serait constant, et la courbe de Cornu serait une circonférence. En réalité, R variant périodiquement comme $K(z)$ et reprenant la même valeur chaque fois que $z$ croît de $\frac{\lambda}{2}$, la courbe de Cornu est formée d'une suite de festons tous identiques. R s'annulant pour des valeurs de $z$ qui diffèrent de $\frac{\lambda}{2}$, deux festons consécutifs se raccordent par un point de rebroussement. Et, comme la direction $\alpha$ de la tangente à la courbe

varie d'un point d'un feston au point homologue du feston suivant de

$$\Delta\alpha = 2\pi \frac{2\frac{\lambda}{2}}{\lambda'} = 2\pi \frac{\lambda}{\lambda'}$$

qui est, en général, différent de $2\pi$, la corde joignant les extrémités d'un feston quelconque fait un angle constant $\Delta\alpha \neq 2\pi$ avec la corde du feston suivant. La courbe s'appuie ainsi sur une circonférence circonscrite aux cordes précédentes. La vibration résultante a pour amplitude la droite qui joint l'origine O à l'extrémité A de la courbe. On voit que, si le nombre de concamérations $\left(\text{intervalles } \frac{\lambda}{2}\right)$ dont on ajoute les effets, va en augmentant, l'amplitude OA varie périodiquement sans jamais croître au-delà du diamètre OB de la circonférence sur laquelle festonne la courbe de Cornu, lieu de l'extrémité A du segment OA.

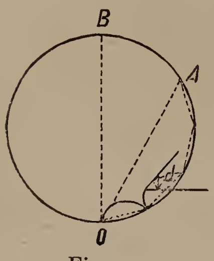


Fig. 91.

Chaque couleur $\lambda' \neq \lambda$ de la lumière éclairante donne ainsi une intensité réfléchie proportionnelle à un facteur qui ne peut dépasser $OB^2$.

Mais si $\lambda' = \lambda$, on a $\Delta\alpha = 2\pi$, c'est-à-dire que la tangente à l'extrémité de chaque feston (point de rebroussement) est parallèle à *ox*. Le feston suivant est donc obtenu en transportant le précédent de la quantité $OA_1$ le long de $OA_1$. Les amplitudes $OA_1$, $A_1A_2$, ... , qui correspondent aux concamérations successives, s'ajoutent ainsi pour donner une amplitude proportionnelle à leur nombre N, c'est-à-dire proportionnelle pour une même couleur à l'épaisseur *e* de la couche impressionnée et, par suite, une intensité lumineuse réfléchie proportionnelle au carré de cette épaisseur. Le rapport de la lumière réfléchie de cou-

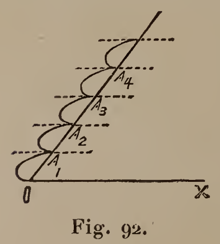


Fig. 92.

leur $\lambda$ à la lumière réfléchie de couleur $\lambda' \neq \lambda$ est ainsi très considérable, et l'intensité de $\lambda'$ est d'autant plus négligeable, c'est-à-dire la pureté de la couleur réfléchie $\lambda$ est d'autant plus parfaite que l'épaisseur de la couche réfléchissante est elle-même plus considérable. La plaque fonctionne à ce point de vue comme un réseau. Elle analyse la lumière blanche incidente et ne réfléchit en quantité sensible que la lumière simple qui l'a impressionnée.

C'est ce qui arrive pour chaque partie de la plaque qui a été impressionnée par une couleur simple du spectre : elle ne réfléchit sensiblement que la lumière qui l'a impressionnée, c'est-à-dire une couleur simple identique à la couleur simple de la région correspondante du spectre. La plaque impressionnée par un spectre fournira donc à la lumière blanche l'image même du spectre avec ses couleurs pures si le spectre impressionnant était pur.

Et ces couleurs réfléchies auront des éclats proportionnels à ceux des couleurs correspondantes du spectre solaire si l'on a préparé l'émulsion en y ajoutant des substances absorbantes convenables. La plaque est alors dite *isochromatique* pour la lumière blanche du soleil. Puisqu'elle réfléchit les couleurs du soleil dans les rapports même où elles existent dans la lumière incidente, son pouvoir réflecteur est le même dans toute son étendue. On verra tout à l'heure ce qui en résulte quand on impressionne la plaque avec une lumière complexe. Pour le moment, on peut en déduire la règle pratique pour préparer une plaque isochromatique ; la photographie du spectre solaire étant faite sans dépôt de mercure ne présente pas de couleurs, mais seulement une teinte grise ; il suffit, pour que l'émulsion soit isochromatique, que la teinte grise soit uniforme dans toute l'étendue du spectre.

*Photographie d'un objet coloré quelconque.* — Pour aborder ce cas général, il faut regarder l'effet de la lumière complexe comme la superposition des effets dus aux différentes couleurs simples qui la composent. Chaque couleur $\lambda$ produit dans l'épaisseur de la couche un dépôt d'argent dont la structure lamellaire et les propriétés diverses ont pour période $z = \frac{\lambda}{2}$. Ce sont les dépôts élémentaires dus

aux différentes couleurs λ et de périodicité $z = \frac{\lambda}{2}$ variant de l'un à l'autre, qui s'ajoutent pour produire le dépôt réel dont les variations de propriétés avec $z$ résultent ainsi d'une périodicité multiple comparable à celle d'un son complexe formé de la superposition de plusieurs sons simples.

Pareille superposition a lieu vraisemblablement pour les pouvoirs réflecteurs dus aux dépôts élémentaires dont le dépôt réel est la somme.

Cela étant, comment ce système va-t-il analyser la lumière blanche du soleil ?

Considérons dans la lumière éclairante une couleur λ.

La quantité de lumière λ réfléchie par la plaque est, d'après l'addition des pouvoirs réflecteurs, la somme des quantités réfléchies par les différents dépôts élémentaires produits par les différentes couleurs simples de la lumière impressionnante.

Or le raisonnement fait au début montre que la couleur λ de la lumière éclairante n'est réfléchie en quantité sensible que par celui de tous ces dépôts élémentaires qui a été produit par la même couleur λ de la lumière impressionnante, et qui est ainsi équivalent au dépôt entier au point de vue de la réflexion de la couleur λ.

Une région déterminée de la plaque réfléchit ainsi toutes les couleurs λ qui l'ont impressionnée, et celles-là seulement. D'ailleurs, la plaque étant supposée rendue isochromatique pour le spectre solaire, le pouvoir réflecteur relatif à l'épaisseur entière de la plaque serait le même pour tous les dépôts de périodicité $z = \frac{\lambda}{2}$ si la plaque avait été impressionnée par les couleurs mêmes du spectre solaire. Elle a été impressionnée par une lumière qui renferme la couleur λ en quantité $f(\lambda)$ par rapport à l'intensité de cette couleur dans le spectre solaire ; le pouvoir réflecteur sera pour cette couleur, proportionnel à son intensité dans la lumière impressionnante ; s'il était 1 dans le cas où la lumière impressionnante est celle du spectre solaire, il sera donc $f(\lambda)$ pour le cas de l'objet coloré, et par suite, si la plaque est exposée à la *lumière blanche du soleil*, l'intensité de la couleur λ dans la lumière réfléchie, qui

était proportionnellement la même que dans la lumière impressionnante pour le cas de la photographie du spectre solaire, c'est-à-dire le même que dans le spectre solaire, sera à celle-ci dans le rapport $f(\lambda)$, c'est-à-dire que les couleurs réfléchies par une région déterminée de la plaque auront des rapports d'intensité égaux à ceux qu'ils avaient dans la lumière qui a impressionné la plaque dans cette région. Autrement dit, la plaque exposée à la lumière blanche du soleil fournira l'image de l'objet photographié avec ses couleurs et ses teintes fidèlement reproduites et ayant la même composition que les couleurs des différents points de l'objet lui-même, si complexes qu'elles soient.

Si la plaque est exposée non plus à la lumière blanche du soleil, *pour laquelle elle a été rendue isochromatique,* mais à une lumière telle que celle d'une lampe à huile par exemple, les intensités des différentes couleurs simples seront altérées dans le rapport de l'intensité de chaque couleur de la lumière de la lampe à l'intensité de la même couleur de la lumière du soleil.

Si, en particulier, la plaque est une photographie du spectre solaire, elle réfléchit le spectre même de la lampe tel que le donnerait le spectroscope ou le réseau au moyen duquel on a photographié le spectre solaire.

La théorie dont on vient d'exposer sommairement le principe est due à M. Lippmann lui-même, qui l'a exposée en détail, l'an dernier, devant la Société française de Physique.

*Remarques sur les hypothèses faites.* — On n'a pas tenu compte des retards par réflexion. Or, si l'on suppose que le retard par réflexion sur un plan variable P est constant et égal à $\frac{\lambda}{2}$, il affecte également toutes les vibrations et les différences de phase ne sont pas changées. Si le retard par réflexion dépend de la densité et de la structure du dépôt d'argent sur le plan P, il est bien certain qu'il doit, comme cette structure, se reproduire tous les $\frac{\lambda}{2}$, et cela seul a été nécessaire au raisonnement fait plus haut dont les conclusions subsistent par suite.

Une hypothèse moins permise est celle qui consiste à

admettre qu'il n'y a pas de perte de lumière par réfraction et pas d'absorption par la plaque.

Il faut, en réalité, remplacer la fonction périodique K ($z$) par une expression périodique en $z$ multipliée par un facteur d'affaiblissement qui diminue quand $z$ augmente et d'autant plus rapidement que l'absorption est plus énergique.

Les formes des courbes sont alors modifiées.

L'angle que font les tangentes de deux éléments correspondants aux deux festons consécutifs est toujours constant et égal à $\Delta\alpha = 2\pi \frac{\lambda}{\lambda'}$. Mais, par suite du facteur d'affaiblissement, les festons successifs diminuent progressivement de longueur. La courbe de base n'est plus un cercle : les diverses courbes que l'on peut faire passer par les points de rebroussement sont des spirales.

Dans le cas de $\lambda' = \lambda$ les amplitudes des vibrations réfléchies par les concamérations successives s'ajoutent, et la conclusion essentielle subsiste : les couleurs réfléchies par une région de la plaque sont celles qui ont impressionné cette région ; seulement le fait que les amplitudes vont en décroissant indéfiniment impose à l'intensité de la lumière réfléchie $\lambda$ une limite indépendante de l'épaisseur de la plaque.

Quant à la composition de la lumière réfléchie, elle est altérée puisque le pouvoir absorbant de la plaque qui intervient ici est essentiellement fonction de la longueur d'onde. Une autre raison est que l'amplitude $OA'^n$ de la vibration résultante réfléchie pour la couleur $\lambda'$ différente de la couleur $\lambda$, qui a seule impressionné une région de la photographie du spectre, peut très bien ne pas être négligeable vis-à-vis de l'amplitude $OA'$ qui correspond à $\lambda$. Il suffit pour cela que l'absorption soit suffisamment énergique, c'est-à-dire que les cordes successives $OA_1$ $A_1A_2$... diminuent assez rapidement. On ne peut plus dire alors que la photographie du spectre solaire exposée à la lumière blanche du soleil donne une image fidèle du spectre qui l'a impressionnée. Elle réfléchira des couleurs complexes.

Dans une seconde approximation, on pourra remplacer chaque concamération par un plan réfléchissant, et ne

considérer que l'affaiblissement par réfraction en essayant d'y faire rentrer l'affaiblissement par absorption.

On est alors ramené à un calcul tout à fait voisin de celui des anneaux de Newton en lumière transmise, ce qui suffit déjà pour expliquer comment certaines photographies du spectre solaire présentent une suite de teintes non pas simples comme celles du spectre solaire, mais très analogues à l'une des suites de couleurs de la *Table de Newton* (voir le Mémoire de M. G. Meslin : *Annales de chimie et de physique*, 6e série, tome XXVII, année 1892).

*Influence de la lumière réfléchie à la face d'entrée.* — Cette lumière, dont on n'a pas tenu compte dans les considérations précédentes, est identique, pour la composition, à la lumière qui éclaire la plaque.

Donc, si l'on examine la plaque à la lumière blanche du soleil, les teintes propres de la plaque seront lavées de blanc.

On atténue cet effet en observant la photographie sous l'incidence normale, ce qui rend minimum la proportion de lumière réfléchie.

On peut enfin, comme l'a indiqué M. Lumière, de Lyon, coller sur la couche de gélatine avec un peu de baume de Canada une lame de verre légèrement prismatique. L'indice de réfraction variant peu de la gélatine au baume et au verre, la seule réflexion importante est celle qui a lieu suivant SJS′ sur la face AB.

Les rayons qui ne sont pas réfléchis en J suivent le chemin JRJ′ et sortent colorés dans la direction J′S″, différente de la direction JS′ de la lumière blanche. L'œil placé à une distance suffisante pourra donc recevoir la lumière colorée à l'exclusion de la lumière blanche, et les teintes apparaîtront plus vives.

N. B. — Construction de la courbe de Cornu ou composition géométrique d'une infinité de vibrations infiniment petites (règle de Fresnel).

Si une vibration élémentaire est $da.\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \varphi\right)$, la vibration résultante est :

$$a \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \varphi\right) = \int da. \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \varphi\right),$$

d'où :

1) $$a \cos 2\pi\varphi = \int da. \cos 2\pi\varphi$$

2) $$a \sin 2\pi\varphi = \int da. \sin 2\pi\varphi$$

On construit la courbe dont l'élément d'arc est $ds = da$, faisant avec $ox$ l'angle $2\pi\varphi$. Les équations (1) et (2) expriment que la résultante géométrique $oA$ de tous les segments $ds$ a pour longueur $a$ et fait avec $ox$ l'angle $2\pi\varphi$.

$oA$ représente donc l'amplitude résultante, $Aox$ la phase résultante, et le vecteur $oA$ la vibration résultante $d \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \varphi\right)$.

Dans la théorie de la diffraction d'une onde linéaire, $da$ représente l'élément d'arc de l'onde. Dans les raisonnements faits ici, $da = k(z)\, dz$ ou coefficient de réflexion de la tranche $dz$.

## V

## Pratique du procédé de M. Lippmann.

Fabrication des plaques. — Mode opératoire ; châssis à mercure. — Disposition de l'appareil.

On ne trouve pas encore dans le commerce de plaques à couche sensible assez continue et assez transparente pour répéter l'expérience de M. Gabriel Lippmann. Aussi doit-on les préparer soi-même. Le mieux est d'employer le collodion ou bien l'albu-

mine et la gélatine, mais sensibilisées au bain comme le collodion.

On trouvera dans tous les ouvrages la manière de préparer les plaques au collodion humide ; il suffira d'avoir soin de l'orthochromatiser.

Les plaques à l'albumine se préparent d'après la pratique suivante (1) :

On prend un blanc d'œuf et on le verse dans une éprouvette en verre cylindrique à pied.

Avec un disque de bois presque du même diamètre que l'éprouvette et emmanché au bout d'une baguette, on le baratte afin d'obtenir une mousse très épaisse, on laisse reposer quelques heures puis on filtre sur un tampon de ouate dégraissé en le faisant bouillir pendant une heure dans une solution étendue de potasse.

Une fois filtré, on l'additionne de 4 gouttes de solution saturée à froid de cyanine dissoute dans l'alcool et 2 gouttes de solution d'érythrosine. Après le lavage complet de l'éprouvette on y remet le liquide filtré auquel on ajoute de l'iodure de potassium rougi de la façon suivante :

Dans une bouteille on introduit quelques paillettes d'iode et des cristaux d'iodure de potassium ; au bout de quelques heures, les cristaux sont devenus rouges, on choisit alors les plus teintés et on les met dans

(1) Nous devons à l'obligeance de M. Contamine l'exposé de la méthode qu'il emploie.

une bouteille compte-goutte sur 1/3 de la hauteur, on remplit d'eau distillée. On obtient alors la liqueur saturée dont on verse 6 gouttes dans l'éprouvette contenant l'albumine. Après barattage et repos de trois heures dans une cave fraîche et aérée, on filtre et recommence pendant deux ou trois jours; puis on laisse reposer encore plusieurs jours.

On étend à la tournette deux couches minces puis on sensibilise à l'acéto-nitrate d'argent.

| | |
|---|---|
| Eau . . . . . . . . . . . . . . . | 100 gr. |
| Azotate d'argent cristallisé . | 10 » |
| Acide acétique pur . . . . . | 10 » |

On prépare quatre bains qu'on laisse continuellement exposés à la lumière, et M. Contamine a remarqué que plus les bains avaient servi, meilleurs ils étaient. Ils servent l'un après l'autre ; au fur et à mesure qu'ils diminuent en argent, on ajoute du bain neuf de façon à avoir toujours la même quantité.

Les plaques albuminées se conservent longtemps ; mais une fois sensibilisées, il faut les employer dans les trois ou quatre jours.

Il est bon que les glaces soient rodées du côté non sensibilisé ; car la couche est tellement transparente qu'il n'est pas possible de la voir.

Une fois bien séchées dans une boîte contenant du chlorure de calcium en grande quantité, elles peuvent être mises dans le châssis à mercure.

Ces plaques ont l'inconvénient d'avoir une sensi-

bilité assez faible ; mais on est arrivé à l'augmenter en modifiant les doses de bromures et d'iodures et incorporant à la couche des substances mucilagineuses qui lui donnent plus de perméabilité ; tel est le procédé G. Sella ; ou on verse dans 100cc d'albumine le mélange :

| | |
|---|---|
| Eau . . . . . . . . . . . . . . . . | 4cc |
| Sirop de gomme du codex . . . . | 5 |
| Iodure de potassium . . . . . . . | 1 |
| Iode pur . . . . . . . . . . . . . | 0,2 |
| Bromure de potassium . . . . . . | 0,2 |

La suite des opérations s'effectue comme dans le procédé précédent.

Enfin, on emploiera avec avantage le procédé au collodion albuminé de Taupenot qui consiste à collodionner la plaque préalablement talquée ou albuminée avec le mélange :

| | |
|---|---|
| Ether . . . . . . . . . . . . . . . | 400 |
| Alcool . . . . . . . . . . . . . . . | 400 |
| Coton-poudre . . . . . . . . . . . | 8 |
| Iodure de cadmium . . . . . . . . | 4 |
| Iodure d'ammonium . . . . . . . . | 4 |
| Bromure d'ammonium. . . . . . . | 2 |

dans lequel on aura eu soin d'ajouter quelques gouttes des solutions alcooliques de substances isochromatiques et à l'immerger, quelques minutes après, dans le bain suivant qui doit être acide :

| | |
|---|---|
| Eau . . . . . . . . . . . . . . . . | 100 |
| Azotate d'argent. . . . . . . . . | 7 |
| Acide azotique . . . . . . . . . . | 3 à 4cc |

bain d'où on la sort pour l'égoutter et la laver à l'eau distillée quand son opacité cesse d'augmenter.

On l'égoutte de nouveau, pour verser dessus :

| | |
|---|---|
| Albumine . . . . . . . . . . . . . | 100 |
| Iodure d'ammonium. . . . . . . | 1 |
| Bromure d'ammonium. . . . . . | 0.25 |
| Dextrine. . . . . . . . . . . . . | 3 à 4 |

Après ces opérations qu'on peut effectuer à une faible lumière blanche, on obtient des plaques se conservant bien, qu'il suffit avant de s'en servir de sensibiliser en les trempant trente secondes sans agitation dans :

| | |
|---|---|
| Eau . . . . . . . . . . . . . . . . | 100 |
| Azotate d'argent . . . . . . . . . . | 7 |
| Acide acétique cristallisable . . . . | 7 |

Nous avons vu que les frères Lumière étaient arrivés à fabriquer des émulsions convenables pour le procédé Lippmann. Nous donnons leur mode d'opérer, extrait de leur communication même à la Société française de photographie :

Nous désirons d'abord revendiquer la priorité sur le procédé qu'a fait connaître M. Valenta, de Vienne, et qui consiste à mélanger, pour obtenir l'émulsion, — si tant est que l'on puisse appeler ainsi la préparation obtenue, — deux solutions gélatineuses, l'une contenant un bromure soluble, l'autre du nitrate d'argent. Nous avons, en effet, fait connaître dans une communication, en date du 23 mars 1892, à la Société des sciences industrielles de Lyon, la méthode que nous suivions alors et qui, comme on le verra, diffère très peu de celle indiquée par cet expérimentateur.

Les formules suivantes ont été établies empiriquement, cela va sans dire, mais nous nous sommes efforcés, dans les très nombreuses expériences que nous avons faites, de procéder avec méthode, ne changeant jamais à la fois qu'un seul des éléments constituants, tant en ce qui concerne l'émulsion qu'en ce qui regarde le révélateur. D'où la quantité d'essais nécessités et la durée fort longue de temps que nous avons dû y consacrer.

Pour obtenir l'émulsion sensible, on prépare les solutions suivantes :

| | | |
|---|---|---|
| A | Eau distillée . . . . . . . . . . | 400 gr. |
| | Gélatine . . . . . . . . . . . | 20 » |
| B | Eau distillée . . . . . . . . . . | 25 » |
| | Bromure de potassium . . . . | 2 , 3 |
| C | Eau distillée . . . . . . . . . . | 25 » |
| | Nitrate d'argent. . . . . . . . . | 3 » |

On ajoute à la solution C la moitié de la solution A, puis l'autre moitié de cette dernière est additionnée à B. On mélange ensuite ces deux solutions gélatineuses en versant le liquide contenant le nitrate d'argent dans celui contenant le bromure de potassium. On additionne ensuite d'un sensibilisateur convenable : cyanine, violet de méthyle, érythrosine, etc., puis l'émulsion est filtrée et couchée sur plaques. Cette opération doit se faire à la tournette, la température de la solution ne dépassant pas 40 degrés.

On fait prendre la couche en gelée ; puis les plaques sont immergées dans de l'alcool pendant un temps très court, traitement qui permet le mouillage complet de la surface, et enfin on lave dans un courant d'eau. La couche étant très mince, le lavage ne demande que fort peu de temps.

Cette méthode présente sur celle indiquée par M. Valenta, l'avantage d'éviter le grossissement du grain du bromure d'argent, grossissement résultant du lavage de la masse et du chauffage nécessité pour la refonte, et de

permettre l'obtention de plaques d'une transparence complète. De plus, on doit éviter, pour la même raison, l'emploi d'un trop grand excès de bromure soluble.

Les plaques, ayant été lavées suffisamment, sont mises à sécher, puis, avant l'emploi, traitées pendant deux minutes par la solution suivante :

| | |
|---|---|
| Eau . . . . . . . . . . . . . . . . . | 200 |
| Nitrate d'argent . . . . . . . . . . | 1 |
| Acide acétique. . . . . . . . . . . | 1 |

Ce dernier traitement permet d'obtenir des images beaucoup plus brillantes. Il augmente, en outre, la sensibilité, mais amène assez rapidement l'altération de la couche sensible. On sèche de nouveau, puis la plaque est exposée conformément aux indications données par M. le professeur Lippmann.

Depuis, MM. Lumière ont apporté de nouveaux perfectionnements à leurs procédés :

1° En incorporant à la matière sensible un mélange de matières colorantes convenables (violet de méthyle et érythrosine) et en plaçant, en avant de l'objectif, un écran coloré, formé par une solution d'acide picrique, MM. Lumière sont arrivés à obtenir une courbe de réductibilité du sel d'argent presque identique à la courbe de sensibilité de l'œil.

2° Ils ont remarqué que la température et l'état hygrométrique de l'atmosphère où se sèchent les plaques avaient une notable influence sur leur sensibilité chromatique ; afin d'obtenir des résultats constants, ils ont construit un séchoir, dans lequel arrive l'air préalablement saturé à la température de 15°, puis réchauffé électriquement (au moyen d'un

fil métallique traversé par un courant électrique qui en élève la température comme on le désire) afin d'éviter l'influence désastreuse des gaz résultant de la combustion.

Ils ont même pu obtenir des clichés avec une minute de pose.

Les amateurs peuvent se servir du séchoir ventilateur de la fig. 93, construit par Richard (1).

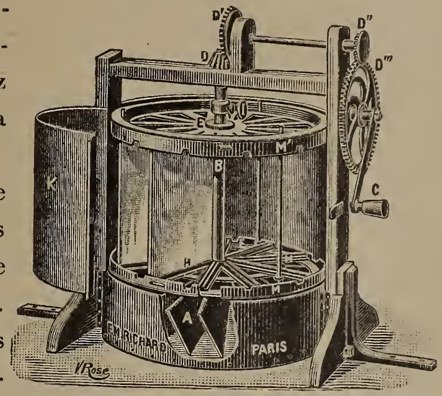



Fig. 93.

Voici la formule d'émulsion recommandée par Valenta :

| | | |
|---|---|---|
| A | Gélatine | 10 gr. |
| | Nitrate d'argent | 6 » |
| | Eau | 300 » |
| B | Gélatine | 10 » |
| | Bromure de potassium | 5 » |
| | Eau | 300 » |

On mêle les deux solutions à la clarté d'une lumière rouge, en versant A dans B et en agitant constamment; l'émulsion doit avoir l'aspect d'un liquide blanc légèrement diaphane; cette émulsion ne doit pas être chauffée au-dessus de 40° cent. ; c'est une condition essentielle pour éviter le grain ; l'émulsification finie, le liquide est versé

(1) On en trouvera la description dans le numéro de décembre 1894 du journal *La Photographie*.

dans un flacon contenant un litre d'alcool ; l'émulsion se précipite en petits fragments. On filtre pour éliminer l'alcool, et l'émulsion, divisée au moyen d'une fourchette en bois, est lavée à l'eau courante pendant douze heures. On l'introduit alors dans un verre à précipiter et on y verse de l'eau de façon à ce qu'une fois fondue au bain-marie elle atteigne le volume de 300 c. c. ; l'émulsion est alors filtrée à travers du coton hydrophile ; on ajoute alors les couleurs susceptibles de la rendre orthochromatique ; il ne reste plus maintenant qu'à l'étendre sur les glaces à la manière ordinaire.

Pour l'exposition, on opère d'après les indications de M. Lippmann ; la durée de la pose est de 10 secondes à deux minutes, en se servant du spectroscope de Steinheil et de la lentille convergente, qu'on adapte à cet appareil.

La plaque étant sensibilisée et orthochromatisée, il faut l'exposer. On peut se servir des chambres noires habituelles ; mais il faut avoir un châssis négatif spécial, un châssis à mercure, formant miroir.

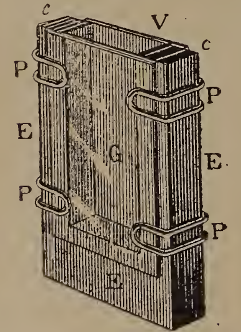


Fig. 94.

Dans l'*appareil de M. G. Lippmann*, la plaque G (fig. 94) est appliquée, face sensible en dedans, contre un cadre un peu épais, en ébonite, E, dont l'autre côté reçoit une lame quelconque V. Le tout est fortement serré au moyen de pinces P, et l'ensemble constitue une petite cuve dont la couche sensible forme une des parois verticales intérieures, et que l'on remplit de mercure. La cuve est soutenue, par un support convenable, sur le fond de la chambre

noire, et de manière que la couche sensible occupe la place F (fig. 94) du verre dépoli après la mise au point.

Un châssis plus commode est celui que fabrique le Comptoir général de photographie, dirigé par Richard, châssis construit sur les indications de M. Contamine, l'habile membre de la Société photographique de Lille, l'un de ceux qui ont pu répéter l'intéressante expérience de M. G. Lippmann (fig. 95).

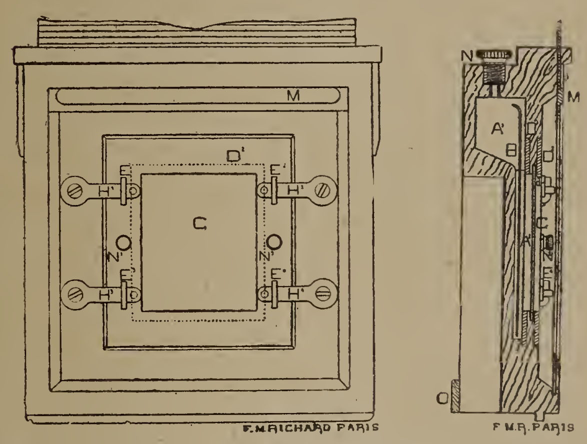



Fig. 95. — Châssis Contamine. — A' réservoir à mercure ; EEE'E' caoutchouc.

Le fonctionnement de ce châssis est assuré d'une façon simple et très pratique. Il peut être ajusté sur n'importe quelle chambre 13 × 18. Le principe diffère essentiellement du châssis en usage pour obtenir la photographie des couleurs. Il se compose de trois parties distinctes : un réservoir de mercure dans le haut, la cuve à mercure

proprement dite occupant le centre de l'appareil, et une auge pour le trop plein dans le bas.

Ces dispositions ont été adoptées pour permettre l'introduction facile du mercure dans la cuve, par un simple mouvement de redressement du châssis. Dans le réservoir supérieur, on verse la quantité de mercure nécessaire jaugée d'avance. Une lame d'acier le laisse passer en un mince filet. La cuve se compose d'un fond en bois verni ou ébonite entouré d'une bande de caoutchouc encastrée dans le bas et sur les côtés et dépassant d'un millimètre la battée ménagée pour recevoir la glace dans le plan de mise au point.

Cette glace est fixée par un cadre en fer garni de cuir dur régularisant la pression sur la battée. Ce cadre, à charnières dans le bas, est serré par des écrous ou à l'aide de clefs dont les têtes font un quart de tour sur des surfaces héliçoïdales.

Le réservoir du bas est disposé pour recueillir le mercure s'il déborde de la cuve pendant le transport, ou s'il s'écoule par insuffisance de serrage ou bris de plaques.

Une vis en fer formant robinet permet de le vider facilement.

La dimension des glaces ou verres est de 10 × 10 et la surface utile de 8 × 8. Une fois les clichés obtenus, on peut recouper un centimètre de chaque côté, de façon à avoir des plaques 8 × 8.

Il est prudent de roder un peu les angles des glaces du côté non sensibilisé, pour permettre de reconnaître au toucher la façon dont la glace doit être placée dans le châssis, car la couche sensible étant d'une transparence parfaite et les opérations devant se faire dans le cabinet noir, il ne serait pas possible, sans cette précaution, de placer la glace d'une façon certaine.

Voici maintenant la description du maniement du châssis interférentiel.

Dans une grande cuvette pour recueillir le mercure au cas de fuites, le châssis est placé à plat, le cadre en fer redressé, la glace est posée entre les battées, les coins rodés en dessus et par conséquent la face sensibilisée en dessous; puis le cadre en fer abaissé, un quart de tour aux clefs

ou quelques tours aux écrous, la glace se trouve assujettie fortement. Dans le cas d'emploi de verres ordinaires, on place un premier cadre en carton sur le verre, pour compenser la différence d'épaisseur et obtenir le serrage nécessaire.

Il ne reste plus qu'à redresser doucement le châssis, en lui imprimant quelques secousses pour que le mercure, filtrant une dernière fois, vienne se placer entre la couche sensible, sans bulles ni stries.

Il doit être filtré, chaque fois, c'est-à-dire versé dans un entonnoir dont le bout a été effilé le plus possible à la lampe, et dans lequel on a introduit un fil de platine de façon à ce que le filtrage fût complet.

Monsieur M. Mendoza a aussi construit un tel châssis dont voici la description :

Au bout du cadre d'un châssis en bois presque semblable au châssis négatif ordinaire, se pose la glace émulsionnée spéciale, *gélatine en dessous*. Une plaque d'ébonite, munie d'un cadre saillant en caoutchouc, cadre plus petit que cette plaque et soudé sur l'une de ses faces, s'applique sur la glace émulsionnée, le caoutchouc contre l'émulsion. Des pinces ou crampons se rabattent alors sur la plaque d'ébonite et la serrent fortement au moyen de vis en écrasant le cadre de caoutchouc contre la glace sensible. Ainsi se trouve constituée la cuve à mercure ; il ne reste plus qu'à la remplir en introduisant ce métal par un trou percé dans la plaque d'ébonite à l'aide d'un petit entonnoir en papier ou d'un cornet métallique spécial. Quand la cuve est remplie, le trou d'introduction se bouche par une vis en fer. Parfaitement clos, le châssis peut alors être transporté en pleine lumière sans crainte ; il se place sur la chambre de l'appareil comme tous les autres châssis et l'exposition de la plaque se fait avec le dispositif de planchette mobile ordinaire.

La maison Derogy construit également sur commande des châssis à mercure très pratiques.

Enfin, il est assez facile d'en construire un soi-même, en prenant une lame mince de tôle de la dimension de 9/12, par exemple, et collant dessus un petit cadre de sparadrap AAaa, BBbb, de 1 centimètre de large, en ayant soin de laisser une petite solution de continuité CCcc, pour l'introduction du mercure. On chauffe légèrement et il suffit d'appliquer dessus la surface sensible pour former une petite cuvette qu'on mettra dans un châssis ordinaire; deux ou quatre bagues de caoutchouc consolideront au besoin. On enlève facilement la plaque sensible en chauffant légèrement.

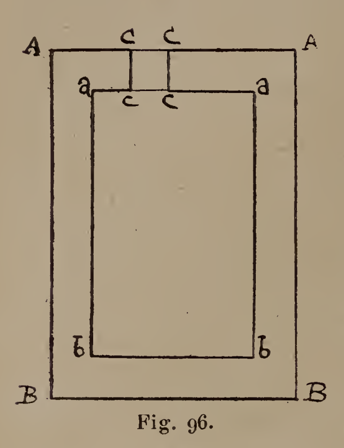


Fig. 96.

Quant à la disposition de l'appareil, elle est assez simple et variera avec l'objet à photographier et l'éclairage. La fig. 97 montre la disposition adoptée par M. Lippmann pour la photographie d'un vitrail D éclairé au moyen d'une lampe à arc du système Canie de 8.800 bougies renfermées dans une lanterne AB munie d'un condensateur. Une cuve C, remplie d'alun, arrête les radiations calorifiques, et une cuve E est destinée à recevoir des liquides colorés. La chambre noire est montée sur une table horizontale, munie

de son objectif; il est évident que pour l'éclairage solaire, dans le cas d'un paysage par exemple, la disposition est modifiée; il est inutile de l'indiquer.

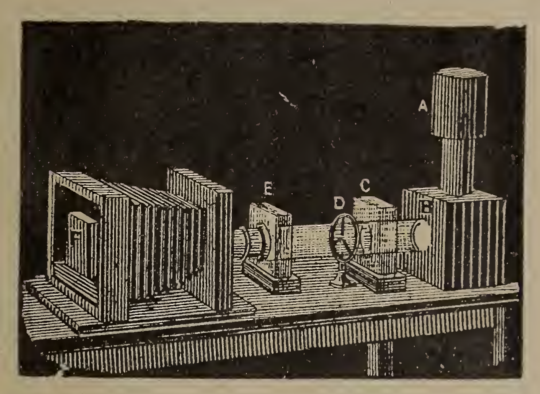



Fig. 97.

Comme objectif, tous peuvent être employés; cependant, particulièrement en ce qui concerne la reproduction du spectre, il est bon de choisir.

D'après M. Contamine, le meilleur consiste en un objectif formé de spath et quartz, car certains objectifs, surtout ceux très rapides, ne laissent pas passer tous les rayons colorés du spectre.

M. Contamine se sert aussi avec succès d'un objectif construit par Chevalier il y a une quarantaine d'années. Pour lui, si les constructeurs pouvaient arriver à livrer des objectifs spéciaux laissant passer les rayons rouges et retenant les rayons jaunes et

surtout les bleus, ils rendraient service aux personnes faisant des recherches pour le procédé Lippmann.

En attendant, il emploie une cuvette en glace à faces parallèles dans laquelle il a mis un liquide coloré obtenu par bâtonnements et composé d'hélianthine et de primuline.

Il a aussi réussi en mettant des couches d'albumine colorée sur une des faces de la glace.

M. Lippmann, au début, faisait la pose en trois fois : pour les radiations rouges, vertes et bleues.

1° Il interposait pendant toute la pose du rouge, une petite cuve de glace, à faces bien parallèles, pleine d'une solution d'hélianthine rouge ne laissant passer que les radiations rouges et absorbant complètement les radiations bleues, jaunes et violettes (1). 2° Quand le rouge avait suffisamment posé, il remplaçait l'hélianthine par une solution de bichromate de potassium, ne laissant passer que le vert et le rouge et absorbant toutes les autres radiations; dans ces conditions, on impressionne à loisir la partie de la plaque correspondant au vert, le rouge continue à poser pendant ce temps. 3° Enfin, pour obtenir le bleu et le violet, on découvrait l'objectif quelques secondes sans l'interposition d'aucune cuve.

Les écrans à employer dépendent de la façon

(1) Voir Alph. Berget. — Photographie des couleurs.



M. LIPPMANN DANS SON LABORATOIRE

(Extrait de l'o[illegible] M. Dillaye : *Les Nouveautés Photographiques*).

dont la plaque a été orthochromatisée ; il en est de même du temps de pose ; ainsi, nous avons vu qu'un seul écran à l'acide picrique suffisait maintenant aux frères Lumière ; le temps de pose dépend aussi de la couche sensible employée : il est très long avec l'albumine.

Le développement qui semble convenir le mieux est celui au pyrogallol.

Voici le révélateur employé par les frères Lumière :

| | | |
|---|---|---|
| Sol. 1. | Eau. . . . . . . . . . . . . . . . . | 100 |
| | Acide pyrogallique . . . . . . . . | 1 |
| Sol. 2. | Eau. . . . . . . . . . . . . . . . . | 100 |
| | Bromure de potassium . . . . . . | 10 |
| Sol. 3. | Ammoniaque caustique (D=0, 960, à 18 deg.) | |

Pour développer, on prend :

| | |
|---|---|
| Sol. I. . . . . . . . . . . . . . . . | 10 |
| Sol. II . . . . . . . . . . . . . . . | 15 |
| Sol. III . . . . . . . . . . . . . . | 5 |
| Eau. . . . . . . . . . . . . . . . . | 70 |

Le titre de l'ammoniaque a une importance très nette, car des variations assez faibles dans les proportions ci-dessus diminuent vite l'éclat des colorations.

Après développement, la plaque est lavée, fixée par une immersion de 10 à 15 secondes dans une solution de cyanure de potassium à 5 o/o et enfin séchée.

Un révélateur constitué par une dissolution ammoniacale de chlorure cuivreux nous a également donné

de bons résultats, mais son instabilité très grande nous l'a fait abandonner.

M Contamine se sert, pour développer, d'un bain chaud composé de 3 à 4 gr. de carbonate d'ammoniaque dissous dans 50 à 60cc d'eau et 7 à 8 gouttes de solution à 10 o/o de bromure de potassium ; il y plonge la glace et y ajoute de l'acide pyrogallique un peu à la fois jusqu'à ce que la glace vue par transparence soit bien colorée et l'image bien apparente ; il faut quelquefois plus de 20 minutes pour l'opération.

Quant au fixage, les bains habituels peuvent servir, notamment la solution d'hyposulfite de sodium à 150 grammes par litre d'eau ; le fixage est très rapide, à cause du peu d'épaisseur de la couche sensible.

On peut renforcer les images au bichlorure de mercure pour accroître leur éclat ; MM. Lumière l'augmentent encore par un nouveau développement.

Les couleurs ne commencent à apparaître qu'au séchage. C'est à la lumière diffuse qu'on les voit le mieux. MM. Lumière en ont avivé les teintes en supprimant la lumière réfléchie par la couche de gélatine, par le collage sur l'image d'un prisme d'angle très faible au moyen du baume de Canada et en recouvrant l'épreuve de vernis noir.

On ne peut avoir l'idée de l'aspect que présente ces couleurs quand on ne les a pas vues ; elles ne ressemblent en rien aux couleurs de convention des

peintres, couleurs fausses pour le physicien en tant qu'elles prétendent à rendre exactement la nature, et, de plus, produites par des pigments qui s'altèrent à la longue.

Les images photographiques obtenues de la manière que nous venons de décrire sont absolument inaltérables. On peut sans crainte les projeter avec une violente lumière électrique (1).

Leur projection procure à l'œil une sensation agréable, qui donne l'illusion complète des colorations naturelles, dont elles procèdent d'ailleurs par voie de filiation directe, et non pas par contrefaçon, au sens scientifique de ce mot.

## VI

### Conclusion.

### L'avenir de l'expérience de M. Lippmann.

Lorsqu'on aura pu fabriquer des plaques plus sensibles et d'une sensibilité aux couleurs comparable à celle de l'œil ; lorsqu'en un mot, on pourra faire de la chromophotographie instantanée, les services que rendra à l'art, à la science et à l'industrie la mémorable expérience de M. Lippmann, ne se compteront pas. L'imagination a beau jeu à poursuivre

(1) L'angle d'incidence du faisceau lumineux doit être de 45°.

ces mille applications ouvertes dès aujourd'hui à la photographie directe des couleurs ; nous nous arrêterons à une observation assez intéressante.

Léonard de Vinci disait au chapitre 53 de son *Traité sur la peinture* : « Les peintres se désespèrent en voulant imiter la nature parce que leurs peintures manquent de ce relief et de cette vivacité que les objets présentent cependant lorsqu'on les voit dans un miroir... Il est impossible que la peinture, quelle que soit la perfection des lignes, ombres, lumières et couleurs, puisse donner le relief naturel... »

C'est à propos du problème résolu par le stéréoscope que le grand maître s'exprimait ainsi. Il en dirait aujourd'hui sans doute davantage en voyant les belles chromophotographies de M. Lippmann. Prenez la meilleure toile où un artiste ait figuré une flamme directement et comparez-la au modèle, une bougie par exemple. Il y a un abîme entre les deux ; et cependant la ressemblance est parfaite entre la flamme d'une bougie et son image dans un miroir. C'est qu'au travers de la surface antérieure et des premières zones lumineuses, vous voyez les régions postérieures de la flamme et jusqu'aux particules lumineuses les plus reculées. La flamme transparente doit à ce que nous appellerons cette sorte de profondeur un aspect que la peinture nécessairement opaque n'aura jamais.

(1) Voir Abel Buguet. — Photo-Journal n° 2.

Les couleurs des nacres et partant celles des images obtenues par l'ingénieux procédé de M. Lippmann ont quelque chose de cette sorte de profondeur de la flamme de bougie transparente, de cette couleur aérienne pour ainsi dire, couleur qui a frappé tout le monde, et dont le reflet caractéristique la distingue absolument de tous les aspects que présentent les corps observés par diffusion et en particulier les couleurs des peintres.

Ceux-ci ont vu, quelques-uns du moins, une concurrence gênante à leur art dans la découverte du savant professeur de la Sorbonne ; d'autres, plus nombreux, il faut le dire, ont admiré la découverte et compris sa portée, et ont même prié le maître de venir lui-même la leur exposer, ce qu'il a volontiers fait avec sa complaisance habituelle. Certainement, dans le cas où le peintre ne joue vis-à-vis de la nature qu'un rôle de copiste, le procédé Lippmann se substituera avantageusement à lui ; mais il y aura toujours une part pour l'interprétation, et la photographie des couleurs ne tuera pas plus la peinture que les chemins de fer n'ont tué la diligence. Bien au contraire, elle permettra de divulguer les œuvres d'art en donnant le moyen d'en prendre des épreuves fidèles au double point de vue du dessin et de la couleur ; ainsi, dans les pyramides d'Égypte, il y a des peintures hiéroglyphiques qui se sont conservées jusqu'ici à l'abri d'une profonde obscurité.

Seule la photographie des couleurs pourrait permettre de les reproduire et de les étudier. De même, seule aussi, elle permettra de comparer un tableau à lui-même en rapprochant des photographies prises à diverses époques, et de cette manière on arriverait probablement à découvrir la cause de la détérioration rapide de certaines peintures et peut-être aussi, par suite, les remèdes à y apporter.

Il est vrai que, depuis quelque temps, la photographie ne se contente pas d'être une fidèle copiste; elle a des tendances à devenir créatrice : témoin les belles expositions d'art photographique du Photo-Club, et les derniers essais d'illustrations photographiques du livre, essais dus à MM. Magron et Mendel, qui ont eu un grand succès (1). Il se pourra même qu'il arrive un temps, comme le souhaitait M. Jansenn en 1890, où « les jeunes artistes laissant là les » préjugés dont on rougira bientôt, viendront résolument s'emparer de la chambre noire pour en faire » d'abord l'auxiliaire avoué de leurs études et, plus » tard, pour nous apporter des œuvres, fruits d'une » connaissance approfondie des procédés photographiques et d'un grand sentiment esthétique. Ce » jour-là, nous aurons une branche nouvelle de l'art » qui nous donnera de belles jouissances et la nature

(1) Voir en décembre 1894 dans « *La Photographie* », un article de M. Reyner à ce sujet.

» sera glorifiée une fois de plus par une voix qui
» n'avait pas encore été entendue ».

A la science, la chromophotographie rendra évidemment des services de la plus haute importance. Pouvant reproduire rigoureusement, non seulement la forme, mais encore la couleur du modèle, il sera possible de comparer deux phénomènes identiques, se produisant dans des conditions analogues ou à peu près, à un certain temps d'intervalle, comme s'ils se montraient simultanément à nos yeux. Cela permettra à chacun de reconnaître beaucoup plus facilement que sur les descriptions les mieux faites et les plus « colorées » les différences qu'ils pourront présenter.

Ainsi, pour ne citer que deux exemples, Arago, dans les relations qu'il a données des éclipses totales de soleil ou de lune, ou des éclipses annulaires, fait remarquer, comme beaucoup d'autres astronomes l'avaient déjà fait avant lui, que ces éclipses sont toujours accompagnées de colorations singulières de l'air et du passage correspondant, colorations quelquefois fantastiques. Il serait très intéressant de pouvoir comparer ces colorations dans deux ou un plus grand nombre d'éclipses consécutives. Seule, la *photographie instantanée des couleurs* pourra le permettre, ce genre de phénomènes étant toujours de très faible durée. De même il serait impossible d'opérer autrement pour comparer les couleurs des

corps qui varient périodiquement et très vite, comme celles des étoiles qui scintillent et celles des planètes; car ces planètes scintillent également, quoiqu'en disent les livres élémentaires, et le soleil lui-même paraît ne pas être exempt de cette infirmité.

Pour ce qui est des sciences naturelles il suffira de citer les services qui seront rendus à la zoologie, à la botanique, à l'anatomie et particulièrement à la médecine, surtout en ce qui concerne les maladies cutanées et éruptives.

A l'industrie la reproduction photographique des couleurs permettra de conserver des modèles fidèles; la manufacture des Gobelins pourra par exemple posséder un catalogue complet de toutes les tapisseries qu'elle fabrique ; les fabricants de ces soieries lyonnaises tant admirées pourront envoyer à leurs clients des modèles de leurs plus belles pièces dont aucune gravure colorée ne serait capable de reproduire l'aspect.

Mais, avant de rendre ces services, la chromophotographie a de grands progrès à réaliser. Ceux relatifs à la rapidité sont en voie de se produire. On ne peut annoncer encore les mêmes perfectionnements en ce qui concerne la reproduction, à un grand nombre d'exemplaires, des clichés. Mais le problème n'est pas insoluble, et peut être résolu dans un temps très voisin.

En résumé, grâce surtout aux découvertes de

Daguerre, Niepce, Poitevin, Marey, Lippmann, dont les noms sont désormais inséparables, la photographie est capable de donner d'un objet quelconque des images fidèles au triple point de vue de sa forme, de son mouvement et de sa couleur. C'est un Français qui a achevé de dégager la troisième inconnue de ce problème dont la première avait été trouvée aussi par un Français, ce qui a fait dire que la photographie avait commencé par Daguerre pour aboutir à Lippmann.

---

# CINQUIÈME PARTIE

---

## La Photochromographie

OU

## Reproduction indirecte des Couleurs.

CINQUIÈME PARTIE

# La Photochromographie

ou

# Reproduction indirecte des Couleurs

## I

### Principe et historique.
### Ch. Cros et L. Ducos du Hauron.

Nous avons vu (3e partie, chapitre III) que Brewster avait émis l'hypothèse qu'il n'existe que trois couleurs physiquement distinctes (rouge, jaune, bleu), dont la superposition en proportion variable fournit toutes les couleurs du spectre. Cette théorie des trois couleurs étant inadmissible, on a pensé alors (Helmboltz, Young, page 137) qu'il fallait reconnaître seulement trois sensations différentes, correspondant à trois systèmes de fibres nerveuses, inégalement affectées par un rayon quelconque de lumière simple. Ainsi, le sentiment des couleurs ne tiendrait qu'au rapport de ces trois impressions qui seraient, d'après Young,

produites par trois couleurs fondamentales : le rouge, le vert et le violet.

Depuis, Maxwell a montré qu'une couleur quelconque peut s'obtenir par le mélange de trois couleurs simples et a appris à composer ces trois couleurs. Mais les diverses méthodes données à cet effet ne sont que qualitatives ; Helmboltz a bien essayé d'introduire la notion d'intensité des couleurs, mais ses tables sont demeurées indéterminées. Cette indétermination ne cesse que si l'on considère l'intensité d'une couleur comme étant une quantité variable d'énergie. On trouve alors un principe essentiel, à savoir que l'intensité d'une couleur résultante est égale à la somme des intensités des composantes ; les quantités d'énergie s'ajoutent, et elles sont indépendantes du mécanisme qui les produit. On voit, en approfondissant ces idées qu'une table des couleurs telle que celles de Newton, Maxwell, etc., ne suffit pas pour montrer ce qui se passe dans le mélange de deux couleurs. Une pareille table permet seulement de dire quelle teinte on obtient par le mélange dans des proportions données des couleurs données, mais ne représente pas ce que devient l'intensité d'une couleur formée par le mélange de deux couleurs ayant des intensités $\alpha$ et $\beta$ déterminées.

Il n'en est plus de même si, dans la construction de ces tables, on ajoute une notion de plus, celle

d'intensité, c'est-à-dire celle d'énergie. C'est ce qu'a fait très élégamment le Dr A. Broca, dans une des meilleures thèses de la Faculté de Paris (1), en faisant, non plus une construction plane, comme Maxwell, mais une construction dans l'espace; on peut encore construire une table des couleurs pour chaque valeur de l'énergie.

Ces considérations nous semblaient nécessaires pour indiquer comment, à notre avis, doit être conçue la composition d'une couleur complexe (2). Une telle couleur représente une certaine quantité d'énergie qu'on peut supposer comme formée par une somme d'énergies correspondant à des couleurs déterminées, c'est-à-dire à des longueurs d'onde déterminées, et l'expérience montre qu'il faut au moins trois couleurs simples pour composer une couleur déterminée. De là l'idée des trois couleurs fondamentales; ajoutons que le mélange de trois couleurs simples formant une couleur complexe est toujours lavé de blanc.

C'est dès l'année 1865 que le baron Ransonnet (3), en Autriche, eut l'idée de produire des photolithographies en couleurs. Il proposait de prendre trois négatifs du même objet coloré, le premier à travers un verre rouge, le second à travers un verre bleu, le

(1) Etudes physiologiques, physiques et cliniques, sur la vision des éruptions cutanées. Paris. — L. Battaille et Cie. — 1893.

(2) G.-H. Niewenglowski. — La Photographie, année 1895.

(3) Phot. Correspondenz, tome VI, page 199.

troisième à travers un verre jaune, et de les transporter chacun sur une pierre lithographique de façon à en avoir trois, la première correspondant à l'action des radiations rouges, la seconde à celle des radiations bleues, et la troisième à celle des radiations jaunes. Il suffirait alors de tirer les épreuves comme on tire des chromolithographies.

En 1869, deux Français, Charles Cros et Ducos du Hauron, eurent une idée analogue, le premier se contentant de l'indiquer théoriquement, le second l'ayant appliqué, et ayant pris un brevet le 23 novembre 1868, sous le n° 83061. Leur procédé consistait, en théorie, à faire trois clichés ou phototypes négatifs, le premier sur lequel toutes les couleurs, sauf le rouge, ont agi, et qui fournit l'image positive pour le rouge; — le second sur lequel toutes les couleurs ont agi, sauf le bleu, et qui fournit l'image positive pour le bleu; — un troisième, enfin, sur lequel toutes les couleurs ont agi. sauf le jaune, et dont on tire l'image positive pour le jaune. On superpose, ensuite, au moyen de la photocollographie par exemple, les trois images positives, rouge, bleue et jaune. Bien entendu, ces images doivent être transparentes.

En raison de leur importance, nous donnerons ici quelques extraits des mémoires originaux des deux inventeurs.

Voici ce qu'en février 1869 écrivait M. Ch. Cros :

« Les trois espèces élémentaires de la couleur sont : le rouge, le jaune, le bleu.

» Il s'agit donc de prendre trois épreuves différentes, l'une de tous les points plus ou moins rouges ou qui contiennent du rouge, la seconde de tous les points jaunes ou contenant une proportion de jaune, la dernière de tous les points bleus ou contenant du bleu.

» Ces trois épreuves, en les supposant obtenues en teintes uniformes comme celles de la photographie ordinaire, exprimeront en noir et en gris, plus ou moins foncés, les quantités respectives de rouge, de jaune, de bleu qu'il y a dans tous les points du tableau.

» Ainsi, on aura l'ensemble de tous les *renseignements* sur le tableau proposé, mais non pas sa reproduction pour la vue immédiate. En un mot, l'*analyse* du tableau est faite au point de vue de la couleur...

» Le procédé d'analyse successive par transparence est le premier moyen qui m'est venu à l'esprit ; il consiste *à tamiser les rayons à travers des verres colorés* ».

L'auteur indique un second moyen :

« ... *prendre successivement trois épreuves avec un appareil photographique ordinaire, sans aucune modification, mais en ayant soin d'éclairer les objets à reproduire, d'abord avec de la lumière rouge, ensuite avec de la lumière jaune, enfin avec de la lumière bleue* ».

Il passe ensuite à la synthèse, c'est-à-dire à la reconstitution de l'image colorée, et donne, dans les termes suivants, la solution théorique du problème :

« *La synthèse anti chromatique consiste à superposer réellement les trois positifs sur une surface blanche ou transparente, de manière à obtenir un résultat fixe et visible sans instrument intermédiaire* ».

« Voici comment ce dernier résultat est réalisé. Au moyen des trois clichés, on obtient trois planches hélio-

graphiques sur pierre ou sur acier, planches qui donnent des épreuves *positives.*

» Les parties foncées de l'épreuve rouge, par exemple, représentent les parties du tableau où le rouge a *le moins* agi ; les parties claires, celles où il était en *maximum.* En ces points, où il n'y avait pas de rouge, il ne pouvait y avoir que du noir, du jaune ou du bleu.

» On tire cette première épreuve en *vert*, couleur complémentaire du rouge. J'appelle cette épreuve le *positif antichromatique* du rouge.

» Sur cette épreuve verte on tire le positif *antichromatique* du jaune qui est *violet*, et enfin celui du bleu qui est *orangé.*

» Il faut faire le second et le troisième tirage avec des laques transparentes qui laissent voir dessous la teinte du premier.

» En pratique, il sera probablement meilleur d'obtenir des clichés avec les rayons vert, violet, orangé et le tirage avec les encres rouge, jaune, bleu. On commencera par le tirage en bleu, car les laques transparentes bleues sont rares ; les rouges et les jaunes sont plus faciles à trouver.

» L'épreuve finale, obtenue ainsi par un procédé analogue à celui de la chromolithographie, présente, dans ses teintes mixtes, les mêmes relations que celles du tableau réel, sauf que toutes les couleurs sont assombries par une légère proportion de leur teinte complémentaire, ce qui fait l'effet d'une sorte de base bistre.

» En effet, là où aucune des couleurs n'a agi, les trois épreuves donnent des *maxima* de coloration qui se superposent et produisent du noir ; là où les couleurs ont agi toutes trois en *maxima*, les trois épreuves laissent voir le blanc du papier. En poursuivant l'analyse, il est facile de voir que les teintes mixtes seront réalisées par ce procédé, mais, comme il a été dit, avec une légère proportion de la teinte complémentaire.

» Sauf les difficultés pratiques, on pourrait de même faire les trois tirages sur verre ; le résultat serait analogue aux tableaux peints sur vitraux.

» Une dernière remarque. Pour ceux qui n'admettent pas le principe de triplicité élémentaire de toutes les teintes

posé plus haut sans démonstration, mes solutions restent exactes. En effet, le résultat peut être toujours obtenu avec une perfection que limiterait seulement le nombre des épreuves élémentaires de teintes différentes ».

Par une coïncidence dont l'histoire de la science présente plusieurs exemples, entre autres, pour n'en citer qu'un seul, celui de l'invention simultanée du calcul intégral par Newton et Leibnitz, en même temps que M. Charles Cros publiait l'article dont nous avons extrait les passages qui précèdent, M. Ducos du Hauron exposait, dans une brochure intitulée « *Les couleurs en photographie* ; *solution du problème* » des idées analogues.

M. Ducos du Hauron, après avoir rappelé les difficultés auxquelles irait se heurter le *procédé direct d'héliochromie* tel que l'avaient cherché MM. Becquerel, Niepce de Saint-Victor, etc., ainsi que nous vous l'avons dit précédemment (4e partie, chap. I), pose le problème comme il suit :

« Au lieu de confier au soleil le soin d'engendrer les couleurs, ne pourrait-on pas le charger simplement de les distribuer? Au lieu de chercher une préparation unique, qui absorbe en quelque sorte et qui garde en chaque point de sa surface les colorations des rayons qui la frappent, ne pourrait-on pas soumettre à l'action de la lumière une préparation multiple et polychrome, ou du moins renfermant virtuellement toutes les nuances possibles, laquelle, composée exclusivement de couleurs déjà connues et fournies par l'industrie, serait uniformément étendue sur tous les points de la surface photogénique, dans des conditions telles que sous chacun des rayons simples ou composés qui viennent la frapper se fixât la couleur

simple ou composée correspondante, les autres couleurs étant éliminées sous ce même rayon ?

» Le problème, formulé de la sorte, semble tout d'abord formidable de complication. Malgré sa complexité très réelle, il peut cependant se ramener à des termes moins décourageants, et voici comment je m'en suis rendu maître :

» J'ai appelé à mon aide un principe de physique fort connu. Ce principe est celui en vertu duquel les couleurs simples se réduisent à trois, le rouge, le jaune et le bleu, dont les combinaisons en diverses proportions produisent l'infinie variété des nuances de la nature.

» Partant de cette donnée, je me suis dit :

» Si je décompose en trois tableaux distincts, l'un rouge, l'autre jaune, l'autre bleu, le tableau en apparence unique, mais triple en réalité quant à la couleur, qui nous est offert par la nature, et si de chacun de ces trois tableaux j'obtiens une image photographique séparée qui en reproduise la couleur spéciale, il me suffira de confondre ensuite en une seule image les trois images ainsi obtenues pour jouir de la représentation exacte de la nature, couleur et modelé tout ensemble.

» L'intéressant phénomène que ce raisonnement m'avait fait pressentir, l'expérience m'en a démontré la réalité : je l'ai réalisé en diverses manières et sous différentes formes ».

M. Ducos du Hauron, à la différence de M. Ch. Cros, qui s'était contenté d'indiquer une solution théorique du problème, avait étudié la réalisation pratique de son système. Dans une lettre au Président de la Société française de photographie, en date du 9 avril 1874, il rappelle et résume les moyens d'exécution employés par lui. Ces moyens consistaient :

« 1° A obtenir à la chambre noire trois négatifs d'un même sujet, le premier par l'intermédiaire d'un verre vert, le second par l'intermédiaire d'un verre bleu violacé, le

troisième par l'intermédiaire d'un verre orangé (1) ; 2° à obtenir, par les procédés de la photographie au charbon ou par des procédés similaires, tels que la chromolithographie, la photoglyptie (procédé Woodbury), etc., une image positive rouge en faisant usage du premier négatif, une image positive jaune en faisant usage du second négatif, et une image positive bleue en faisant usage du troisième négatif, ces trois images incorporées l'une à l'autre et constituant, par leur unification, l'image définitive ou représentation polychrome de la nature ».

M. Ducos du Hauron indique un moyen de préparer soi-même des verres colorés, et donne également la composition des vernis dont on les enduira. Deux glaces à faces rigoureusement parallèles, taillées en rondelles, sont réunies au moyen de baume du Canada de façon à emprisonner dans l'encollage une couche de vernis, couche simple si elle a été appliquée sur une seule des deux glaces, couche double si elle a été posée sur une partie de chacune des rondelles :

Le verre orangé s'obtiendra ainsi avec une rondelle vernie en rouge superposée à une rondelle vernie en jaune; formules :

*Vernis jaune*

| | | |
|---|---|---|
| Alcool à 40° coloré par la coralline jaune. . | | 100 |
| Benjoin . . . . . . . . . . . | 20 à 25 | |
| Essence de lavande . . . . . | 8 à 10 | |

*Vernis rouge*

| | | |
|---|---|---|
| Alcool à 40° coloré par la fuschine. . . . . . | | 100 |
| Benjoin . . . . . . . . . . . | 20 à 25 | |
| Essence de lavande. . . . . | 8 à 10 | |

(1) Les expériences de l'inventeur l'ont conduit à prendre ces vives couleurs (vert, violet, orangé) à la place de celles choisies d'abord par lui (rouge, jaune, bleu).

Le verre violet sera formé en superposant une rondelle vernie en rouge et une rondelle vernie en bleu. La formule de ce dernier sera :

*Vernis bleu*

| | |
|---|---|
| Alcool à 40° coloré par le *bleu-lumière* . . . | 100 |
| Benjoin . . . . . . . . . . . . | 20 à 25 |
| Essence de lavande. . . . . | 8 à 10 |

Enfin, on superposera, pour avoir le verre vert, une rondelle vernie en jaune et une rondelle vernie en bleu avec les vernis colorés, dont la formule vient d'être indiquée.

Depuis les premiers essais de M. Ducos du Hauron, d'importants perfectionnements ont été apportés à la fabrication des plaques, particulièrement au point de vue de l'orthochromatisme. Ils ont été appliqués au procédé que nous venons d'exposer par l'infatigable chercheur dont les travaux sur la chlorophylle et, en dernier lieu, sur l'éosine, ont d'ailleurs contribué dans une fort honorable mesure à la découverte des perfectionnements mêmes dont nous parlons (1).

En 1876, Albert l'aîné, photographe de la cour de Munich, put obtenir d'excellentes phototypies en couleurs par un procédé analogue au précédent.

(1) Nous sommes heureux de pouvoir donner ici un portrait de ce savant modeste et consciencieux dont la dernière invention obtient, en ce moment même, un succès grandissant de curiosité artistique. Nous faisons allusion aux anaglyphes, ces dessins en deux couleurs, chevauchant l'une sur l'autre, donnant, quand on les regarde à travers deux verres colorés, une merveilleuse sensation de relief ; l'objet reproduit (une statue, si l'on veut), apparaissant d'ailleurs avec sa coulenr naturelle (avec la couleur blanche du marbre, dans notre exemple).




L. DUCOS DU HAURON

(Extrait de la *Photo-Revue africaine*)

## II

### Principe et historique *(Suite)*.

Photochromie de M. Léon Vidal. — Photographie en couleurs de M. Germeuil Bomart. — Méthode de MM. Ch. Cros et J. Carpentier.

Vers l'époque où M. Ducos du Hauron accomplissait ses premières recherches, M. Léon Vidal magina et fit passer dans le domaine de l'Industrie la photochromie, procédé d'impression en couleurs où la photographie apporte au travail de l'artiste l'aide inappréciable de son infaillible précision de dessin.

Voici comment l'inventeur, dans son cours de reproductions industrielles (1) professé à l'école des Arts décoratifs, résume ses travaux :

« Tout d'abord, nous avions imaginé, étant donné le cliché négatif de l'œuvre à reproduire, d'en exécuter par contact un cliché positif, et de ce positif nous tirions un certain nombre de négatifs semblables au premier cliché pris à la chambre noire.

» Sur chacun de ces nouveaux négatifs qui peuvent être sur papier translucide au lieu d'être sur verre, on enlève avec une couleur *opaque maniée au pinceau* toutes les parties dont on ne veut obtenir aucun effet lors de la formation de tel ou tel monochrome.

(1) Ce cours a été publié. Un volume in-8°. (Paris, Delagrave, éditeur).

» Ainsi, si nous voulons procéder à l'arrangement du cliché qui fournira le monochrome bleu, nous supprimons à sa surface avec une couleur ou une encre opaque tout ce qui dépend des autres couleurs, et nous ne laissons à la lumière la faculté d'agir que seulement à travers les parties qui sont bleues ou dépendent de la lumière bleue comme les violets, les verts, etc.

» Nous traitons de la même façon le cliché destiné à fournir le monochrome rouge et le monochrome jaune.

» Puis, si ces trois couleurs combinées entre elles ne paraissent pas devoir suffire, nous pouvons encore préparer de nouveaux clichés qui permettront d'obtenir certains monochromes d'une valeur locale, comme des bleus, des rouges, qui ne sauraient être produits par la combinaison entre elles des trois couleurs essentielles. On peut de la sorte arriver à faire six et même douze clichés distincts, absolument comme on produit un égal nombre de monochromes lithographiques ».

On voit, d'après le dernier paragraphe cité, que non seulement le procédé opératoire diffère de celui de M. Ducos du Hauron, mais encore qu'au point de vue théorique, M. Léon Vidal n'admet pas le système des trois couleurs-mères, du moins avec le caractère absolu qu'y attachaient MM. Ch. Cros et Ducos du Hauron.

« Un dernier cliché, continue M. Léon Vidal, traité spécialement au point de vue du noir ou de la couleur des ombres, sert à un tirage final du dessin complet, modelé dans toutes ses parties, suivant les effets relatifs d'ombre et de lumière du modèle. C'est le *bistre* des lithochromes, mais bien plus vrai, bien plus complet que tout ce qui peut être exécuté à la main ».

Cette très ingénieuse idée d'ombrer après coup le dessin achève de différencier les méthodes. Elle est

le principe même de l'invention de M. Léon Vidal qui l'a conservé en modifiant, en vue d'une application industrielle plus facile, toute la première partie de son procédé. Au lieu du travail, si délicat, de retouche des clichés, l'artiste aujourd'hui exécute les dessins monochromes, d'après les décalques d'un simple cliché reportés sur autant de pierres lithographiques que l'ont veut avoir de teintes, plates ou modelées, à superposer.

« La première partie du travail devient ainsi purement chromo-lithographique. Le tirage des couleurs s'exécute mécaniquement suivant les moyens habituels (lithographie ou phototypie), et, à la fin, le dessin et le modelé photographiques arrivent une seule fois pour emprisonner à leur place les couleurs et ajouter à leur modelé propre celui que nous appelons le modelé ou la couleur de l'ombre, couleur ayant sa valeur en plus de celle des couleurs modelées par elles-mêmes » (1).

C'est en général par la photographie (procédé Woodbury) qu'est imprimée en dernier lieu sur l'épreuve colorée l'image photographique des ombres du modèle. Le procédé au charbon et la phototypie pourront être préférés suivant les cas.

*Polychromie Germeuil-Bomard.* — Dans ce système, on dépose, au moyen de patrons convenablement découpés, des substances colorantes, sensibilisées de nuances diverses selon la teinte à obtenir, sur

(1) V. Léon Vidal, ouvr. cité, p. 288.

une première image très légère obtenue à l'aide d'un cliché ordinaire sur du papier sensibilisé. On place ensuite à nouveau le même cliché très exactement repéré, sur l'image, et l'on expose le tout dans le châssis-presse à la lumière dont l'action, plus ou moins vive, nuance les teintes plates du positif. L'image colorée ainsi obtenue est ensuite fixée, lavée, etc., comme un positif ordinaire.

Ce très court exposé suffit pour montrer que ce procédé est bien inférieur à la photochromie Léon Vidal.

*Méthode de MM. Ch. Cros et J. Carpentier.* — Cette méthode, consistant essentiellement dans des tirages polychromes par voie d'impression photographique sur des couches d'albumine coagulée, a été présentée par ses deux auteurs à l'Académie des sciences.

Quelques extraits du mémoire communiqué à l'Institut en feront connaître le principe :

« Les images sont obtenues au moyen de trois clichés d'après le même objet : clichés faits respectivement à travers un écran liquide orangé, un écran vert, et un écran violet...

» Les épreuves sont constituées, sur la glace-support, par trois couches de collodion albuminé. On prépare ces couches en versant d'abord sur la glace du collodion contenant 2 ou 3 parties pour 100 de bromure de cadmium. On immerge ensuite la glace dans un bain d'albumine, fait de dix ou douze blancs d'œufs pour 1 litre d'eau.

» L'albumine se coagule dans la trame du collodion par

l'action de l'alcool et du bromure de cadmium. On a ainsi constitué une couche très régulière d'une trame assimilable à celle du *coton animalisé* des teinturiers. Cette couche est imbibée de bichromate d'ammoniaque, puis séchée à l'étuve. Alors on applique sur la plaque ainsi sensibilisée un *positif* par transparence, et l'on expose pendant quelques minutes à la lumière diffuse. La plaque est lavée ensuite et plongée dans un bain colorant.

» Sous l'action de la lumière, le bichromate a fait subir à l'albumine, déjà coagulée, une second contraction, telle qu'elle ne se laisse plus imbiber ni teindre par les pigments appropriés. Mais, dans les parties protégées par les opacités du positif, la matière colorante pénètre et se fixe.

» Il est donc facile d'obtenir par ce moyen des images photographiques en toute espèce de couleurs. Ces images, produites sur glace, sont invariables dans leurs dimensions. Il suffit donc, pour nos tirages colorés, de répéter trois fois les opérations sur une même glace, en employant : 1° pour l'image obtenue à travers l'écran vert, un bain colorant rouge ; 2° pour l'image de l'écran orangé, un bain de bleu ; 3° enfin pour l'image de l'écran violet, un bain de jaune.

» Les mêmes écrans, les mêmes pigments servent à reproduire tous les sujets polychromes proposés.

» ...Dans l'obtention des clichés, les écrans sont placés *devant les lampes*, en sorte que l'objet, éclairé d'une lumière monochrome, est photographié avec un appareil ordinaire, sans l'interposition d'un milieu coloré qui arrête et diffuse un peu de lumière... ».

On remarquera qu'il n'y a véritablement photographie des couleurs, au sens rigoureux de ce mot, dans aucun de ces procédés. Seule l'expérience de M. Lippmann nous montre une solution éminemment rationnelle, et par cela même, merveilleusement simple de la question proposée. Au reste, les procédés, directs ou indirects, supposent tous, pour

emprunter une expression au langage mathématique, l'introduction de « variables arbitraires » dans le problème : nous entendons par là les écrans colorés sur le rôle desquels nous allons insister.

## III

### Analyse des couleurs.

Obtention des trois négatifs monochromes. — Emploi des plaques isochromatiques et des écrans colorés.

On pourrait, pour obtenir les trois négatifs correspondant aux radiations bleues, jaunes et rouges, se servir de plaques ordinaires en interposant respectivement devant chacune d'elles un écran ne laissant passer que les radiations bleues, un écran ne laissant passer que les radiations jaunes, et enfin un écran ne laissant passer que les rouges. Mais il faut avoir soin que ces écrans ne laissent absolument passer que les radiations pour lesquelles ils sont faits.

On les emploiera selon la méthode donnée par M. Lippmann, que nous avons décrite dans le chapitre VII (3e partie). Mais en opérant ainsi, le temps de pose est très long pour les radiations jaunes, encore plus pour les rouges.

Il serait préférable d'employer des plaques ayant une sensibilité aux couleurs analogue à celle de l'œil ; mais il n'en existe pas.

Il n'est pas bon d'opérer comme le faisait Ducos du Hauron, avec un même genre de plaque orthochromatique pour les trois phototypes.

Le mieux est d'employer :

1° Pour le négatif qui doit être impressionné par les radiations rouges une plaque au gélatino-bromure orthochromatisée spécialement par le rouge, telle que celle fabriquée par les frères Lumière ou par Peiron ; si on l'orthochromatise soi-même, on se servira de la cyanine comme sensibilisateur optique (voir 3e partie, chap. VIII) et on aura soin, pendant la pose, de placer devant l'objectif un écran absorbant les radiations bleues, vertes, jaunes, etc., ne laissant absolument passer que les radiations rouges. Le meilleur est d'employer une petite cuve à faces parallèles remplie d'une dissolution d'hélianthine rouge.

2° Pour le négatif qui doit être impressionné par les radiations jaunes, une plaque orthochromatisée spécialement pour le jaune, telle que celles spécialement fabriquées par MM. Lumière ou par Perron ou d'autres fabricants, ou bien que l'on orthochromatisera soi-même, au moyen de l'azaline ou mieux de l'éosine ; et on interposera devant l'objectif un écran ne laissant passer que les radiations jaunes et absorbant les autres ; une cuve à faces parallèles remplie d'acide picrique peut rendre ce service.

3° Pour le négatif qui doit être impressionné par les radiations bleues, il suffit de se servir de plaques

ordinaires, avec un écran bleu ou violet et même sans écran.

L'une des plus grandes difficultés qu'on rencontre est l'évaluation des temps de pose; on conçoit qu'ils varient avec la sensibilité des plaques employées, l'éclairage de l'objet, etc.

Cependant nous dirons, avec M. Léon Vidal, qui a pratiqué ce triage de couleurs, que pour le troisième, la pose peut être très courte, quelquefois même d'une fraction de seconde ; pour le deuxième, elle doit être environ le triple de celle afférente à la plaque ordinaire et pour le premier, de cent quatre-vingts fois, celle du troisième.

En sorte que si l'on estime que la plaque ordinaire doit être soumise à un temps de pose d'une seconde, les données de pose doivent être :

1re plaque . . . . . . 180 secondes = 3 minutes.
2e plaque . . . . . . 3 secondes.
3e plaque . . . . . . 1 seconde.

Cette exagération de la pose est certainement un des écueils du procédé ; cependant on est arrivé à fabriquer des plaques orthochromatiques au rouge, d'une sensibilité aux radiations rouges sinon égale, du moins comparable à celle des plaques ordinaires aux radiations bleues.

Quant au mode de traitement, développement, etc. de ces plaques, nous renvoyons à ce que nous avons dit du traitement des plaques isochromatiques (cha-

pitre VIII, p. 196) ; rappelons seulement que le révélateur qui leur semble préférable est celui au pyragallol (1).

Les trois clichés analytiques étant obtenus il s'agit de les utiliser pour reconstituer les couleurs, pour en refaire la synthèse. Cette synthèse peut être durable ou temporaire selon les procédés employés ; nous passons en revue dans les deux chapitres suivants les méthodes proposées jusqu'à ce jour pour opérer la synthèse durable et pour opérer la synthèse temporaire.

## IV

### Synthèse durable des couleurs

Tirages positifs au charbon. — Autres procédés. — Impressions polychromes.

Supposons les trois clichés négatifs obtenus comme nous venons de l'indiquer. Il reste à en tirer des positifs sur des papiers respectivement rouge, jaune

(1) *C'est en faisant un tel triage* des couleurs que MM. Schlumberger et Soret dont le procès récent avec la Banque de France est bien connu, reproduisait photographiquement les billets de banque en en faisant deux clichés, le premier avec une plaque sensible au rouge et un écran rouge ; le second avec une plaque rendue très sensible au bleu par de la fluorescéine ammoniacale, en éclairant le billet avec de la lumière bleue, posant très peu et révélant faiblement avec beaucoup de bromure.

et bleu. Nous empruntons au Mémoire original de M. Ducos du Hauron, en date du 5 août 1875, la manière de préparer soi-même ces papiers.

1° *Papier mixtionné carmin.* — Faire dissoudre 10 grammes de carmin dans un litre d'ammoniaque liquide ; étendre ce liquide dans une cuvette ; laisser l'ammoniaque s'évaporer en plein air jusqu'à ce que son odeur ait presque en entier disparu, ce qui demande un certain nombre d'heures ; ajouter alors de l'eau de pluie en quantité nécessaire pour que le volume du liquide redevienne ce qu'il était avant l'évaporation de l'ammoniaque, soit 1000 centimètres cubes ; conserver en flacon ce liquide pour l'emploi. — Prendre 65 centimètres cubes de ce liquide, y ajouter 35 centimètres cubes d'eau de pluie ; y faire tremper à froid pendant une heure environ 15 grammes de gélatine très soluble (gélatine grénetine, par exemple) ; additionner de 1 gramme de sucre ; faire dissoudre au bain-marie à une température modérée, soit 50 à 60 degrés ; filtrer à travers un linge fin, préalablement mouillé, ou dans un entonnoir dont la douille soit garnie d'une éponge fine rendue humide ; recueillir la mixtion dans un vase maintenu au bain-marie ; verser dans un verre gradué la quantité de ce liquide qui sera nécessaire pour couvrir la feuille de papier qu'il s'agit de mixtionner, soit 25 centimètres cubes pour une surface de grandeur plaque entière, et enfin vider le contenu de ce verre sur ladite feuille de papier, *préalablement appliquée sur une glace*, en balançant légèrement dans ses mains la glace et en s'aidant d'une baguette de verre ou d'un pinceau pour régulariser la couche. — Lorsque la gélatine est prise en gelée, il ne reste plus qu'à détacher le papier de la glace et à l'abandonner à dessiccation, en se servant d'une étuve, au cas où la température serait trop basse, c'est-à-dire inférieure à 18 ou 20 degrés centigrades. (La température de cette étuve ne devra pas dépasser 24 ou 25 degrés).

2° *Papier mixtionné jaune de chrome.* — Broyer dans un mortier 25 grammes de jaune de chrome clair en tablette

(couleur d'aquarelle) ; y ajouter, en continuant de broyer et peu à peu, de l'eau de pluie (un litre d'eau de pluie pour les 25 gr.) ; conserver en flacon ce liquide pour l'emploi. — Prendre, après l'avoir agité, 100 centimètres cubes de ce liquide ; y faire tremper à froid, pendant une heure environ, 15 grammes de gélatine, la même que pour la mixtion précédente ; y ajouter un gramme de sucre ; faire dissoudre au bain-marie ; filtrer comme précédemment, et suivre en tout point, pour le reste des opérations jusqu'au séchage inclusivement, ce qui a été dit au sujet du papier mixtionné rouge.

3° *Papier mixtionné bleu de Prusse.* — On a un approvisionnement d'*encre bleue fixe* du commerce, celle qui se trouve chez les marchands d'articles de bureau. Dans un liquide formé de 85 centimètres cubes d'eau de pluie et de 15 centimètres cubes de cette encre (12 à 15 centimètres cubes, suivant que cette encre est plus ou moins intense), on met tremper à froid pendant une heure environ 15 grammes de la gélatine plus haut indiquée, additionnée d'un gramme de sucre ; puis on fait dissoudre au bain-marie, on filtre et on opère exactement comme il a été dit pour les papiers mixtionnés rouges ainsi que pour les jaunes.

4° *Papier gélatiné blanc.* — Le papier gélatiné qui sert de support définitif à l'héliochromie doit être assez fortement gélatiné. J'y emploie la gélatine blanche ordinaire, dite blanc-manger ; les opérations de gélatinage sont les mêmes que s'il s'agissait de préparer des papiers mixtionnés colorés. Le titre de la dissolution est de 10 grammes de gélatine pour 100 centimètres cubes d'eau ; on recouvre de ce liquide le papier à raison de 25 centimètres cubes environ pour surface plaque entière.

Les trois papiers de couleurs mixtionnés sont alors sensibilisés. On emploie, à cet effet, un bain, composé de 100 gr. de bichromate de potasse dissous dans 1000 c.c. d'eau, dans lequel on a ajouté de l'ammoniaque jusqu'à ce que la dissolution devînt d'un jaune clair. Le

mélange a été alors additionné de sucre (20 à 50 gr. par litre).

Les trois épreuves positives obtenues par exposition à la lumière de ces papiers sous le négatif correspondant sont couvertes d'une couche de collodion et reportées sur trois glaces dont on a eu soin d'enduire de cire une des faces. L'opération se fait dans un bain d'eau distillée.

On les réunit ensuite sur une même feuille de papier gélatiné blanc. Pour cela, on plonge d'abord la glace qui supporte l'épreuve jaune dans le mélange suivant :

| | |
|---|---|
| Alcool à 34° . . . . . . . . . . | 200 c.c. |
| Eau distillée . . . . . . . . . . | 100 gr. |

On a soin que la face où l'épreuve est provisoirement fixée soit *en dessus*. La feuille de papier gélatiné blanc, préparé selon la formule indiquée plus haut, est alors plongée, *face en dessous* dans le même bain de façon à ce qu'elle s'applique sur le monochrome jaune. On retire à la fois le papier gélatiné et la glace, on égoutte, et, quand le papier est sec, il se détache lui-même de la glace en emportant l'épreuve jaune.

On plonge le dit papier pendant un moment dans un bain d'éther alcoolisé ; et il est alors prêt à recevoir l'épreuve bleue qu'on y transportera, superposée à la jaune, par le procédé même qui vient d'être décrit.

On opère enfin de même pour le monochrome rouge qui se trouve ainsi appliqué sur les deux autres.

Si l'héliochromie obtenue doit rester sur le papier où elle a été transportée, on terminera l'opération par l'*alunage* dans le bain ci-après :

| | |
|---|---|
| Eau ordinaire . . . . . . . . | 200 c.c. |
| Alun . . . . . . . . . . . . . | 20 gr. |

et l'on collera sur bristol.

Si l'on veut au contraire une héliochromie sur verre (héliochromies transparentes, pour projections, etc.), au lieu d'aluner, on transportera une dernière fois, par une seule et même opération bien entendu, les trois épreuves déjà superposées sur la lame de verre destinée à les recevoir et ensuite à cet effet d'une légère couche de gélatine séchée puis passée à l'alun. L'opération du transport se fait dans le bain alcoolique dont le dosage a été indiqué plus haut. On retire épreuve et verre adhérents l'un à l'autre, on sèche, et en plongeant le tout dans une cuvette d'eau tiède on voit se détacher le papier gélatiné, abandonnant l'héliochromie sur le verre.

Les monochromes destinés à l'héliochromie sur verre, où on les regardera par transparence, doivent être d'une teinte un peu plus foncée que ceux préparés en vue d'être conservés sur bristol. Il suffit pour cela d'augmenter (ou de diminuer) légèrement

la proportion de bichromate de potasse dans le bain sensibilisateur.

L'un des auteurs de cet ouvrage, M. G.-H. Niewenglowski (1), obtient les images polychromes sur verre en employant un procédé plus simple dû à Cros et connu sous le nom d'hydrotypie. Une pellicule de gélatine inextensible autant que possible, une pellicule au gélatino-bromure, dépouillée de son bromure d'argent en la plongeant dans un bain d'hyposulfite par exemple, est sensibilisée par immersion de 3 à 4 minutes dans une solution de bichromate de potassium à 3 %, puis séchée. En isolant trois négatifs respectivement derrière trois positifs tirés d'après les trois monochromes, jusqu'à apparition de l'image et les plongeant ensuite chacune dans le bain coloré lui convenant, elle absorbe la couleur dans les parties non insolubilisées par la lumière, les parties influencées restant telles quelles. Il n'y a plus qu'à superposer les trois monochromes.

On peut, pour faire superposer les trois positifs, employer d'autres procédés que ceux que nous venons de mentionner et, en particulier, les divers procédés photomécaniques tels que la photoglyptographie, la photocollographie, la phototypographie, c'est-à-dire la phototypie, ou la gravure en relief.

Nous avons déjà vu que c'est Ransonnet qui, le

(1) Voir *La Photographie*, année 1895.

premier, en 1865, a eu l'idée de procéder ainsi en photolithographie, que Vogel, Ducos du Hauron, Albert, Vidal, etc., avaient perfectionné ces procédés. L'imprimerie polychrome existait bien avant la photographie : on sectionnait à l'aide de caches ou silhouettes les images imprimantes en autant de compartiments qu'on voulait créer de teintes différentes ; on obtenait ainsi une sorte de mosaïque ; la chromolithographie est venue apporter un nouveau perfectionnement.

Enfin la photographie permet de substituer au triage forcément arbitraire des couleurs exécuté par un artiste, un triage mécanique, impersonnel, qui peut par suite être plus parfait. Mais pour obtenir de beaux résultats il faut avoir soin de bien faire les trois clichés originaux, en se conformant exactement aux indications du chapitre III, de choisir convenablement les trois encres d'impression et enfin d'assurer un repérage parfait.

Malheureusement peu d'industriels se donnent la peine d'attacher tout le soin désirable à ces diverses difficultés et en particulier ne savent faire au moyen de la photographie qu'un triage imparfait qu'on est forcé de corriger par des retouches.

Néanmoins nous avons pu voir de beaux spécimens de ces impressions polychromes, qui, bien que ne donnant pas une reproduction aussi fidèle des couleurs que le procédé direct de M. Lippmann, sont

appelées à condition d'être très soignées, à rendre de grands services pour les illustrations en couleurs nécessitant un grand tirage.

Nous renverrons aux traités et journaux spéciaux, notamment au *Moniteur de la photographie*, pour les détails de ces intéressants procédés.

Nous dirons seulement que dans l'emploi de la phototypographie il faut avoir soin de se servir de réseaux ou trames à une seule direction de ligne et prendre trois directions différentes pour les clichés ou planches phototypographiques correspondant aux trois couleurs ; on prendra par exemple pour l'un une ligne d'une certaine direction et pour les deux autres une ligne inclinée à 45° sur la précédente, mais en sens inverse pour les deux ; si on se servait d'un quatrième cliché, on employerait une ligne de direction perpendiculaire à la première.

Nous donnons ci-joint une planche en couleur de papillons obtenue d'après nature par ces procédés, et sortie des ateliers de la « The Photochromatic Printing C° de Belfast ». Il serait à désirer qu'on pût faire faire de tels tirages en France.

---






REPRODUCTION DIRECTE D'APRÈS NATURE, AU MOYEN DE TROIS COULEURS.

## V

### Synthèse temporaire

Projections polychromes. — Héliochromoscope Yves. — Stéréochromoscopes Nachet et Niewenglowski. — Anaglyphes de Ducos du Hauron.

La méthode à l'aide de laquelle on peut, possédant trois clichés analytiques d'un objet coloré, reconstituer temporairement, dès qu'on le désire, les couleurs de l'objet, a quelque analogie (1) avec celle qui permet de reconstituer, à un instant donné, à l'aide d'un phonogramme, la parole ou une combinaison de sons quelconques, grâce au phonographe. En ce qui concerne les couleurs, on arrive par un procédé qui offre avec celui du phonographe une certaine analogie, à réaliser ce qu'on appelle un chromogramme, constitué par l'ensemble des trois images photographiques non colorées qui, disposées dans un appareil convenablement choisi, permettent la reconstitution des couleurs de l'original.

L'un des premiers procédés, indiqué pour la première fois dès 1869, dans les notes publiées à cette époque par MM. Ch. Cros et Ducos du Hauron, à la suite chacun de recherches indépendantes, est basé

(1) Voir un article de Léon Vidal dans la *Revue Encyclopédique* de 1893.

sur l'emploi des projections. Le principe du système consiste à projeter sur un écran, en les superposant, trois épreuves positives incolores, obtenues au moyen des trois clichés correspondant respectivement aux rayons bleus-violets, verts et rouges-oranges du modèle, et à éclairer en même temps ces épreuves par des radiations semblables aux rayons qui ont donné naissance au phototype reproduit par chacune d'elles.

M. Vidal, en France, notamment au Congrès de photographie de 1893, a fait voir de ces projections colorées, trois images.

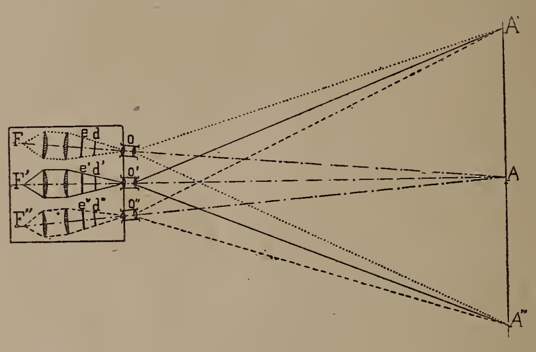



Fig. 98.

On se sert, pour les projeter, d'un système de trois lanternes à projection, dit lanterne triple. La figure 98 montre la marche des rayons. Les sources lumineuses F, F', F", envoyent la lumière qui est concentrée par les condensateurs sur les écrans colorés E, E', E" qui la tamisent, en sorte que les positifs

D, D', D" ne sont traversés respectivement que sur de la lumière violette, rouge et verte. Les trois positifs donnent à travers les trois objectifs O, O', O", des images agrandies sur l'écran qui se confondent en A, A' A", laissant apparaître ainsi une image polychrome d'un effet souvent merveilleux.

Il faut mettre derrière le positif correspondant au négatif impressionné par les radiations bleues au bleu-violet ; derrière celui correspondant au cliché impressionné par les radiations jaunes et vertes un verre vert et derrière le positif correspondant au négatif impressionné par les radiations rouges un verre jaune-orangé.

On peut employer une seule lanterne soit en projetant une épreuve transparente sur verre obtenue soit par le procédé au charbon, soit par l'hydrotypie soit en superposant deux positifs sur verre aux sels d'argent, colorés par des vernis ou par immersion dans des matières colorantes, en plaçant entre les deux un positif sur pellicule coloré de la même manière.

Enfin le meilleur dispositif est celui que M. Gabriel Lippmann employait déjà vers 1886. La planchette d'une chambre ordinaire porte trois petits objectifs rangés en ligne droite et munis respectivement de trois cuves remplies de solutions convenables ; à chaque objectif correspondait une plaque orthochromatisée pour les radiations que laissait passer la

cuve correspondante ; on tire trois positifs que l'on met à la place du verre dépoli et qu'on éclaire fortement en ayant soin de placer des verres de couleur convenable devant les objectifs ou les positifs ; on obtenait ainsi sur un écran une image dont on faisait varier la dimension en interposant une lentille convergente ou divergente entre l'écran et les objectifs. On peut produire avec le même dispositif, légèrement modifié, une image aérienne ; on voit alors l'objet en couleurs et en relief (voir *La Photographie*, n° de février 1895).

L'expérience des projections polychromes montre la différence essentielle qu'il y a entre l'effet des radiations colorées et celui des couleurs pigmentaires.

Le tableau suivant montre en regard les deux séries de couleurs à employer, dans le cas des projections (radiations) et dans le cas des impressions (pigments) respectivement pour les trois positifs, I, II et III :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| I. | Correspondant | au négatif impressionné | par les radiations | rouges. |
| II. | id. | id. | id. | jaunes-vertes. |
| III. | id. | id. | id. | bleues et violettes. |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Positifs I. . | Rouge-orangé | Radiations. | Bleu d'outremer | Pigments. |
| — II. . | Vert | | Carmin | |
| — III. . | Bleu-violet | | Jaune de chrome | |

On voit que les couleurs pigmentaires à employer sont à peu près complémentaires des couleurs propres aux radiations correspondantes.

M. Léon Vidal a proposé récemment un emploi

simultané des projections polychromes et de la méthode directe de M. Lippmann ; nous l'exposons en citant ses propres termes :

En deux mots, il s'agirait non plus d'aller se promener sur nature avec le châssis au mercure et avec des plaques *ad hoc*, mais de ne faire l'opération de l'impression directe que dans l'atelier où le procédé Lippmann deviendrait un moyen de tirage, de multiplication des images polychromes.

Pour retrouver les couleurs et reproduire l'image, telle qu'elle est sur nature, on procéderait par voie de reconstitution en projetant un chromogramme sur un écran.

Soit l'ensemble des trois diapositifs éclairés par trois milieux colorés convenables.

La reproduction de cette projection polychrome mettrait l'expérimentateur dans des conditions identiques à celles où l'on se trouve en photographiant le spectre par la méthode Lippmann.

Il n'est donc pas douteux que l'on obtiendrait un résultat très rapproché de la polychromie reproduite.

L'expérience n'est pas nécessaire pour savoir ce qui en résulterait et, dans ce cas particulier, ce sont les épreuves originales, fournissant la sélection des couleurs, qui mériteraient un soin tout spécial pour que cette sélection fût aussi complète que possible.

Nous ne reviendrons pas sur cette opération déjà ancienne, mais que les procédés orthochromatiques, perfectionnés continuellement, permettent d'exécuter avec une précision toujours plus grande.

On aura toujours un moyen de s'assurer, soit avec le stéréochromoscope de Nachet, soit à l'aide des projections, du rendu donné par le chromogramme et l'on ne procédera au tirage interférentiel que si l'examen de ce rendu paraît satisfaisant. Si des retouches sont nécessaires soit aux négatifs, soit aux diapositifs, on les fera, et le tirage, soit la reproduction de l'image en couleurs par le procédé Lippmann, n'aura lieu que si l'on est dans les conditions requises.

Et alors, tout étant installé, on pourra successivement imprimer un nombre d'images en couleurs plus ou moins grand. On sera le maître de la pose, dont la durée importera peu, on pourra faire varier les conditions de l'orthochromatisme, soit à l'aide d'écrans colorés, substitués les uns aux autres, pendant la pose, soit en ne procédant à la reproduction qu'en photographiant chaque monochrome successivement, opération des plus simples, puisqu'il suffirait de n'ouvrir qu'un seul des objectifs des lanternes en laissant les deux autres bouchés. Le repérage de la superposition ne peut, en ce cas, subir la moindre atteinte et les durées de pose pourront varier suivant que l'on se trouvera en face des radiations bleues plus actiniques et des rouges moins actiniques, quel que soit l'état *panchromatique* des plaques sensibles employées.

Le dispositif convenable sera facilement établi, les trois lanternes (1) projetteront leurs images contre un écran en verre dépoli en arrière duquel et bien dans l'axe, perpendiculaire à cet écran, se trouvera l'appareil photographique muni de son châssis à cuve de mercure.

De cette façon la mise au point, la réduction à telle échelle déterminée s'obtiendront très aisément.

L'éclairage électrique est toujours celui qui conviendra le mieux afin de n'avoir pas à compter avec les radiations plus ou moins jaunâtres des diverses autres sources de lumière artificielle.

On nous objectera que ce n'est pas là un procédé direct de reproduction des couleurs.

Nous répondrons que le résultat n'en sera pas moins obtenu directement d'après un sujet polychrome. Or, si la polychromie indirecte est bien dans la valeur de l'original, quel mal y aura-t-il à ce qu'on ait modifié, rendu plus facile la marche opératoire.

Assurément mieux vaudrait opérer directement, mais en admettant la possibilité d'y arriver, on n'aurait généralement qu'une épreuve type dont on ne pourrait obtenir la multiplication qu'en la projetant dans des conditions défec-

(1) Il serait préférable, en ce cas, d'employer le dispositif Lippmann pour la projection (page 354).

tueuses et en la reproduisant tout comme il vient d'être dit.

Pour peu qu'on étudie la question, on acquerra vite la certitude qu'il est possible de reproduire sur nature des objets très rapidement, de façon à en avoir des images distinctes, correspondant bien aux couleurs essentielles, dont la combinaison donnera, par voie de projection, des images en couleurs des plus satisfaisantes. Or, n'est-il pas plus pratique, en ce cas, de faire dans l'atelier, où tout peut être installé convenablement, où l'on use d'une intensité de lumière connue, où l'essai primitif, une fois fait, on peut opérer à coup sûr, où l'on a tout son temps, où l'on est à l'abri des difficultés matérielles de toutes sortes avec lesquelles on aurait à lutter en plein air, où le résultat polychrome à reproduire peut être corrigé de façon à se rapprocher plus complètement de la vérité, où enfin, à l'aide de toutes les combinaisons de réseaux connues, on peut obtenir d'après la projection composite, ou mieux d'après chaque monochrome composant projeté, des clichés négatifs, immédiatement utilisables à la typographie polychrome (1).

Un autre procédé se trouve suggéré déjà par M. Ch. Cros, dans son mémoire de 1869, pour arriver à voir la synthèse des trois monochromes directement, sans l'intervention de lanternes à projection. L'idée en a été réalisée dans divers appareils.

Dans l'héliochomoscope de M. Ives, les images des trois clichés, placés avec leurs écrans colorés respectifs dans l'appareil, sont réunies en une seule par un système de miroirs réflecteurs disposés de telle sorte qu'en regardant à travers l'oculaire, l'œil aperçoive les trois images à la fois. La perception

(1) *Moniteur de la Photographie*, année 1894, n° 23.

des colorations du modèle lui-même résulte de la fusion en une seule des sensations perçues.

Nous donnons ci-contre (fig. 101) le dessin de trois phototypes des-

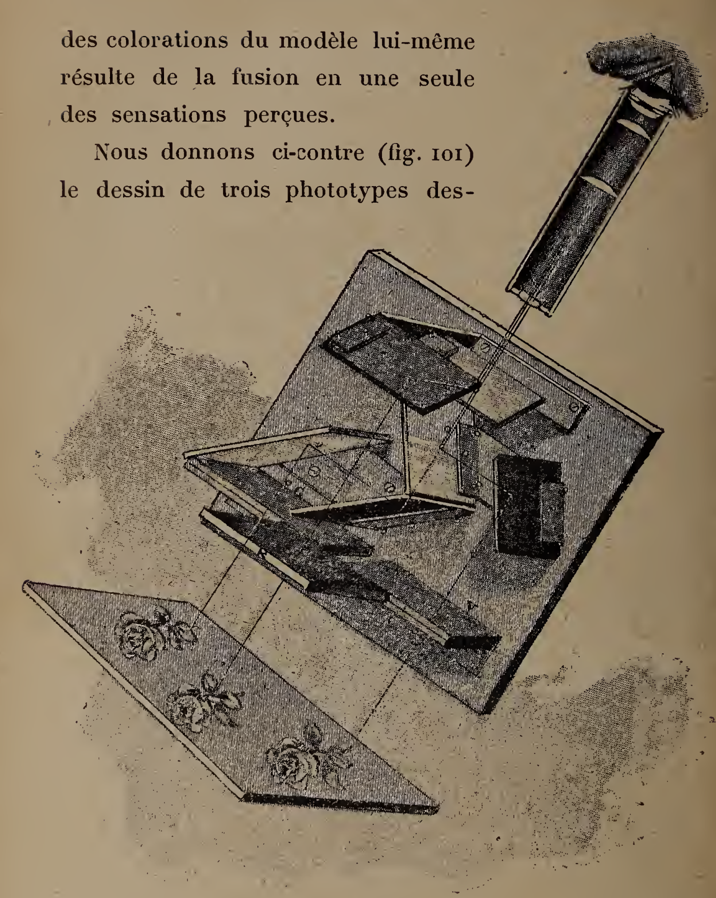


Fig. 99.

tinés à être placés dans l'héliochromoscope Ives ; chacun de ces dessins constitue ce qu'on a appelé un photogramme. L'appareil lui-même offre l'aspect général des figures 99 et 100.

Fig 100



Fig. 101.

L'héliochromoscope Ives est assez compliqué ; un résultat semblable et même plus complet est réalisé par le stéréochromoscope Nachet, dont il a eu l'idée première lors des intéressantes conférences de M. Léon Vidal au Conservatoire des Arts et Métiers en 1891. Il consiste en un véritable stéréoscope ; les deux images stéréoscopiques sont éclairées l'une par un écran translucide rouge, l'autre par un écran translucide bleu, et ont été obtenues photographiquement, l'une ne reproduisant que les blancs, rouges et jaunes de l'original, l'autre n'en ayant reproduit que les blancs, bleus et violets.

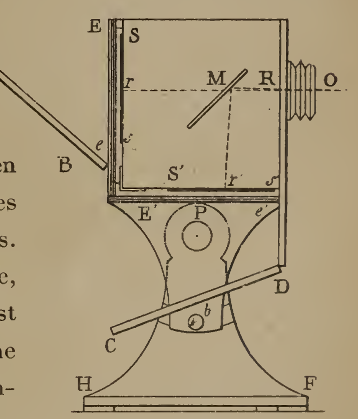



Fig. 102.

Une troisième image, reproduisant le vert est placée sur le fond même du stéréoscope, horizontalement ; un miroir platiné M renvoie l'image de ce diapositif vert se confondre avec l'une des images verticales, la rouge par exemple, en sorte que l'œil regardant à travers le prisme placé devant l'image rouge voit à la fois l'image rouge et l'image verte confondues ; l'autre œil voit l'image bleue ; mais par le fait même de la disposition stéréoscopique, les

trois images se superposent et l'observateur ne voit qu'une seule image, en relief et en couleur.

M. Léon Vidal a pu examiner dans cet appareil des chromogrammes obtenus par lui et a ainsi obtenu une excellente synthèse des couleurs. Ajoutons que l'on pourrait employer une quatrième image, représentant une radiation convenablement choisie, ce que dans certains cas peut permettre une synthèse plus complète.

Nous avons vu qu'il fallait, si l'on supposait une couleur complexe décomposée en trois couleurs simples, tenir compte non seulement de la nuance, mais encore de l'intensité relative des trois couleurs composantes ; on peut la faire varier dans l'ingénieux appareil de M. Nachet en employant des verres de couleur d'épaisseurs différentes.

L'un de nous, M. G.-H. Niewenglowski, fait construire, par MM. Duplouich et Henry, un appareil, inspiré par celui de M. Nachet, où l'on peut faire varier l'intensité relative des couleurs simples des trois diapositifs. Nous nous contenterons de le décrire ; la figure 103 en représente une coupe verticale ; il se compose d'une boîte cubique dont deux côtés VV et RR sont ouverts ; ils reçoivent les diapositifs au nombre de quatre ou de trois ; la paroi verticale T opposée à PN est munie de deux ouvertures contenant chacune un prisme L comme dans le stéréoscope ordinaire ; PP est un assemblage de plaques de verre,

minces et transparentes formant ce que les physiciens appellent un polariseur; A est un analyseur formé d'un prisme nicol ou de lames de verre. La lumière venant d'une source quelconque, du ciel par exemple, tombe sur le diapositif VV qu'elle traverse, traverse le verre coloré vv et se refléchit sur les lames PP pour venir après avoir traversé l'analyseur A et le fragment de prisme L pénétrer dans l'œil de l'observateur, lui faisant voir une image rouge par exemple; la lumière du ciel tombe aussi sur un miroir NM qui la renvoie sur le diapositif RR qu'elle traverse pour traverser ensuite un verre vert rr, les lames PP, l'analyseur et le prisme.

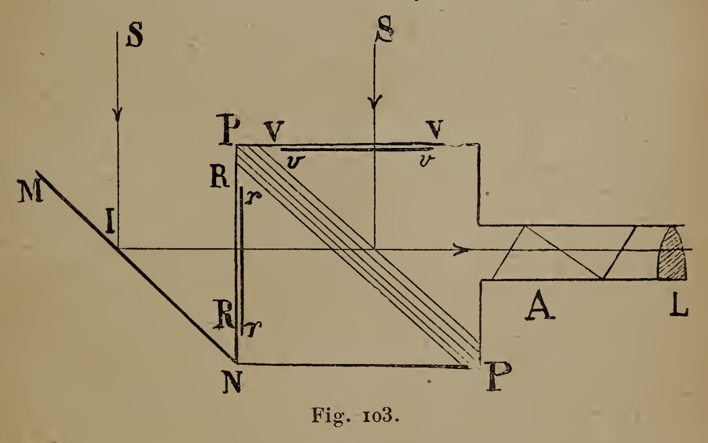



Fig. 103.

L'œil placé devant le prisme L voit ainsi une image verte et une image rouge de l'objet qui se fusionnent; l'autre œil placé devant le second tube

reçoit de même l'image bleue placée verticalement ou horizontalement, et au besoin une quatrième image ; les trois ou quatre images se fusionnent, l'observateur voit l'objet en relief et en couleurs ; mais en faisant tourner les analyseurs A il peut mélanger les couleurs en proportions variables et arriver ainsi à donner à l'objet une vraie coloration.

En ne mettant pas d'analyseur et en remplaçant la pile de glace PP par une simple glace sans tain on a un appareil plus simple mais ne permettant pas de varier la proportion des couleurs.

Qu'il nous soit permis à propos de ces appareils permettant la vision du relief et des couleurs de citer une invention de Ducos du Hauron que l'on voit partout, sous le nom d'anaglyphe et qui consiste en un mode de gravure, imprimée en deux couleurs, produisant des effets stéréoscopiques d'une grande intensité sans autre appareil qu'une paire de lunettes bichromes. Les deux images sont imprimées l'une sur l'autre, ce qui permet l'emploi de tous les formats.

L'image correspondant à la perspective de l'œil droit est, par exemple, imprimée en rouge (minium ou vermillon) sur fond blanc et l'image correspondant à la perspective de l'œil gauche en bleu violet transparent (bleu d'Orient) au-dessus de l'image rouge. Interposant entre la double et confuse image ainsi constituée et l'œil droit un écran en verre ou gélatine



COS DU HAURON

verre rouge devant l'œil gauche et un verre bleu devant l'œil droit.

Lille, imp. Le Bigot frères.

bleu (verre bleu de cobalt) et entre cette même double image et l'œil gauche un verre orange, chaque œil perçoit en noir l'image dont la couleur ne correspond pas à celle du verre interposé, en sorte que chaque œil voit l'image correspondante à sa perspective. Les deux images se fusionnant font voir l'objet représenté en relief.

Nous devons à l'amabilité du directeur du Comptoir Suisse de photographie, dépositaire du brevet Ducos, de pouvoir donner à nos lecteurs une planche anaglyphique.

Passant au moyen du procédé d'hydrotypie de Cros deux diapositifs bleu et rouge correspondent respectivement chacun à un vert et les superposant il suffit de les placer dans une lanterne de projection et de regarder avec une lunette bichrome l'image projetée sur l'écran.

## VI

### Conclusion

La reproduction indirecte des couleurs par la photographie, la photochromographie, comme on l'appelle d'après les règles des Congrès de 1889 et 1892, rend et rendra encore de grands services, en attendant que la reproduction directe ou chromophotographie par le procédé Lippmann, soit assez perfectionnée

pour rentrer dans la pratique courante. Elle est très utile principalement dans le rendu de sujets à couleurs peu complexes ; c'est ainsi que la micrographie et peut-être l'astronomie y trouveront un puissant auxiliaire, surtout au point de vue de l'enseignement, par l'emploi des projections polychromes.

Mais ce sont surtout les impressions polychromes, chromolithographiques ou autres, reproduction des affiches coloriées, des aquarelles, etc., auxquelles elle rend de grands services, en substituant à la main du copiste, toujours guidée par un sentiment artistique personnel, l'action de la lumière constamment identique à elle-même et en portant ainsi dans ce domaine la fidélité de reproduction qui est l'apanage de la photographie.

FIN

# BIBLIOGRAPHIE

## *Ouvrages à consulter.*

### Première et Seconde partie.

E. Mascart. — Traité d'Optique, 3 volumes. Paris, Gauthier-Villars,

Gariel. — Cours de physique.

Jamin et Bouty. — Cours de physique de l'École polytechnique.

O.-N. Rood. — Théorie scientifique des couleurs. Paris, Alcan, 1881.

Brucke et Helmholz. — Principes scientifiques des beaux-arts. Paris, Alcan, 1891.

La lecture de ces deux ouvrages qui font partie de la bibliothèque scientifique internationale publiée sous la direction de M. E. Alglave permettra à ceux qui le désireront d'approfondir à fond la théorie des couleurs.

Colson. — L'Énergie et ses transformations. Paris, Carré, 1888.

### Troisième partie.

A. L. Soret. — Cours théorique et pratique de photographie, 2 vol. Paris, Société d'éditions scientifiques.

G.-H. Niewenglowski. — Notions élémentaires de photographie. Paris, S. Michelet, 1892.

— Notions élémentaires d'Optique photographique. Paris, Société d'éditions scientifiques, 1895.

— Formulaire, aide-mémoire du photographe. Paris, Société d'éditions scientifiques, 1895.

Vogel. — La photographie des objets colorés, avec leurs valeurs réelles, traduit par H. Gauthier-Villars. Gauthier-Villars, Paris, 1887.

Vidal. — Manuel d'orthochromatisme. Gauthier-Villars, Paris, 1891.

Calmette. — Lumière, couleur et photographie. Paris, Société d'éditions scientifiques, 1892.

## Quatrième Partie

E. Becquerel. — La lumière, ses causes ; ses effets. Didot, Paris, 1867-68.

Berget (A.). — Photographie des couleurs par la méthode interférentielle de M. Lippmann. Gauthier-Villars, Paris, 1891.

## Cinquième Partie

Ducos du Hauron (frères). — Traité pratique de la photographie des couleurs. Paris, 1868.

Dumoulin. — Les couleurs reproduites en photographie ; historique, théorie pratique, 2e édition. Paris, Gauthier-Villars, 1894.

Léon Vidal. — Photographie des couleurs et projections polychromes. Paris, Larousse, 1893.

*Consulter en outre les périodiques :*

*Comptes-rendus de l'Académie des sciences.*

*Le Moniteur de la photographie* (*bi-mensuel*). Paris, Gauthier-Villars.

*La Photographie* (*mensuel*), fondée en 1891. Paris, 45, rue Daguerre.

---

# TABLE DES MATIÈRES



## PREMIÈRE PARTIE

### Propriétés de la lumière



## DEUXIÈME PARTIE

### La Nature de la Lumière. — Les Couleurs.

## TROISIÈME PARTIE

### Vision et Photographie



## QUATRIÈME PARTIE

### La Chromophotographie



## CINQUIÈME PARTIE

### La Photochromographie

## TABLE

### DES

## PLANCHES HORS TEXTE

---



---

LILLE. IMP. LEBIGOT FRÈRES.



